

München 1959

DICHTE, POROSITÄT UND CHEMISMUS
IN DER SUBALPINEN MOLASSE OBERBAYERNS

von

WOLFGANG WÄCHTER



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555213_0081

DICHTE, POROSITÄT UND CHEMISMUS IN DER SUBALPINEN MOLASSE
OBERBAYERNS

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilian-Universität
zu München

vorgelegt
von
Wolfgang Wächter
aus
München

Juni 1959

1. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Fischer
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Angenheister

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1959

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der erdölgeologischen Erschliessung des Alpenvorlandes durchgeführt. Für die weitreichende Unterstützung, die mir die Fa. PREUSSAG zur Anfertigung dieser Arbeit gewährte, sei vor allem Herrn Dr. F.BREYER, Herrn Dr. BECKMANN und Frau Dr. HUFFMANN gedankt. Für die Aufnahme in sein Institut und die Betreuung danke ich meinem sehr verehrten Lehrer Herrn Prof. G. FISCHER. Für die Unterstützung beim Sammeln der Proben und für wertvolle Ratschläge danke ich Herrn Direktor NATHAN, Herrn ORR. Dr. GANSS, Herrn Dr. SCHIEMENZ und den Verwaltungen der Bergwerke Peissenberg und Marienstein. Nicht vergessen sei an dieser Stelle mein sehr verehrter Lehrer Herr Prof. emer. H. REICH, der mir die Anregung zu dieser Arbeit gab und mich bis zu seinem Ausscheiden aus dem Institut für Geophysik der Universität München durch Hinweise und Ratschläge unterstützte.



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einführung in die Geologie und die geologischen Probleme des Untersuchungsgebietes	1
Die Untersuchung der Proben	
Chemische Analysen	5
Die Bestimmung der Porosität und Reindichte	
1. Allgemeines	7
2. Beschreibung der Messmethode	8
3. Berechnung der Reindichte und Porosität	9
4. Berechnungsbeispiele	12
5. Die Genauigkeit der Bestimmungen	13
6. Prüfung der Messergebnisse	15
7. Bemerkungen zur Ausweitung des Verfahrens auf die Permeabilitätsmessung	17
7a Anhang	22
Die Auswertung der Messungen	
Beschreibung der untersuchten Aufschlüsse anhand der Messwerte	
1. Tiefbohrung Murnau I	27
Beschreibung des Bohrprofils	28
2. Das Bergwerk Marienstein	30
Beschreibung der Schichten	31
Die Streckung und mächtigkeitsgetreue Darstellung einfach gekrümmter Schichten	34
3. Tiefbohrung Tölz I	35
4. Das Bergwerk Peissenberg	36
5. Die Tiefbohrung Au I bis V	37
6. Zusammenstellung der Durchschnittswerte für die einzelnen Schichten und Aufschlüsse	38
Die allgemeine Auswertung	
1. Dichte, Kalkgehalt, Dolomitgehalt und Fazies.	39
2. Der Wassergehalt und die pelitische Fraktion.	41
3. Die Porosität, der Ton- und der Sandgehalt ..	44
4. Porosität und Druck	45
5. Porosität und seismische Geschwindigkeit	46
6. Die nichtkarbonatischen Anteile	49
7. Die Schwerminerale	52

	Seite
Geologische, paläogeographische und geotektonische Folgerungen	
Die Sedimentation	54
Die Faltung der subalpinen Molasse	56
L i t e r a t u r	58
T a b e l l e n	
Bohrung Murnau I	60
Beschreibung der Probenstücke	64
Bergwerk Marienstein	66
Beschreibung der Probenstücke	70
Bohrung Tölz I	72
Beschreibung der Probenstücke	73
Bergwerk Peissenberg	74
Bohrungen Au 1, 2, 3, 5	74
Beschreibung der Probenstücke (Peissenberg) ...	75
Beschreibung der Probenstücke (Au)	76

Einführung in die Geologie und die geologischen Probleme des Untersuchungsgebietes.

Während der alpinen Orogenese bildete sich nördlich der Alpen ein grosses Sedimentationsbecken aus. Es reichte in Bayern vom Nordrand der Alpen bis zum Kristallin des Bayerischen Waldes und der Albhochfläche im Norden. In diesem Becken wurde hauptsächlich orogener Schutt sedimentiert. Es sind dies Mergel, sandige Mergel, Sande, Nagelfluhmassen und Gerölle. Gegen Ende des Miocän wurden die in diesem Becken abgelagerten Schichten an ihrem Südrand unter dem Druck der nach Norden vordringenden Alpen verfaultet. Man unterscheidet daher eine gefaltete, oder subalpine und eine ungefaltete Molasse. Die Grenze zwischen beiden ist durch steilstehende Störungen gekennzeichnet. Der Südrand der ungefalteten und der Nordrand der angrenzenden gefalteten Molasse sind seil aufgebogen.

Die gefaltete Molasse ist im allgemeinen älter, als die ungefaltete. Die Faltenachsen verlaufen angenähert parallel zum Alpenrand, und zwar so, dass man drei grosse Faltenlinien unterscheiden kann. Die ausgeprägteste ist die südlichste. Sie wird im bayerischen Bereich von der Murnauer Mulde im Westen und der Marienstein-Haushamer-Mulde und Bernauer-Mulde im Osten gebildet. Nach einem, durch Erosion enthaupteten Sattelgebiet folgen nördlich davon von Westen nach Osten die Rottenbucher-, Penzberger-, Miesbach-Auer- und Frasdorfer-Mulde als zweite Faltenlinie. Schliesslich bilden die Peissenberger-, die Nonnenwald- und Rimselrainer-Mulde die nördlichste Linie. Zwischen der Peissenberger- und der Rottenbucher-Mulde ist noch eine kleine Mulde, die Ammer-Mulde, eingezwängt. Rein oberflächlich ist die Lage der zwischen den Mulden aufragenden Sättel oft durch das Anstehen der verwitterungsbeständigen Baustein-Schichten zu erkennen. Es sind dies im oberen Rupel bis unteren Chatt angelagerte, bis 200 m mächtige, quarzreiche Sandsteine. Sie sind im Liegenden und Hangenden durch dichte Mergelschich-

ten abgeschlossen. Das veranlasste bald nach dem ersten Weltkrieg die Geologen, die Molasse als Erdölgebiet in Betracht zu ziehen. Sie wurden darin bestärkt durch die Erfolge, die man am Nordrand der Karpaten, einem geologisch ähnlichen Gebiet, erzielte und das seit langem bekannte Ölvorkommen am Tegernsee. Die ersten Betrachtungen dieser Art stammen von H. de TERRA (1925), K.A. WEITHOFER (1935), M. RICHTER (1936), G. HERBST u. R. TEICHMÜLLER (1936), A. PILGER (1938) und E. KRAUS (1938).

Bei der Untersuchung der Ölhöufigkeit der Molasse ging man meist von dem bereits bekannten Tegernseer Vorkommen aus. M. RICHTER vertrat die Ansicht, dass das bei Tegernsee erbohrte Öl einer sich unter dem Flysch hinziehenden Molasseschicht entstammt. Das Öl wurde meist in den Klüften des Flysch angetroffen, müsste also aus unter dem Flysch liegenden Schichten kommen. Als Beweis für eine mögliche Migration des Erdöls aus der Molasse in den Flysch führt M. RICHTER die grosse Ähnlichkeit des im Flysch und in der Molasse gefundenen Jodwassers an und schliesst daraus, dass auch das Jodwasser von Tegernsee nicht im Flysch entstand, sondern aus der Molasse einwanderte. Der Flysch ist älter als die Molasse. M. RICHTER rechnet mit einer Aufschiebung des Flysch auf die Molasse, die mehrere Kilometer beträgt. Dazu ist jedoch zu bemerken, dass das Erdöl, da es leichter ist als Wasser, meistens nach oben wandert, das Wasser aber eher das Bestreben hat abzusinken. Es erscheint deshalb unwahrscheinlich, dass das Erdöl und das Jodwasser auf dem gleichen Weg in der gleichen Richtung wanderten.

Im gleichen Jahre wie M. RICHTER behaupteten G. HERBST u. R. TEICHMÜLLER, dass unter dem Flysch von Tegernsee keine Molasse mehr sein könne. Der Flysch sei tektonisch viel stärker beansprucht als die Molasse, die Auffaltung des Flyschs müsse also schon vor der Ablagerung der Molasse stattgefunden haben. Dieser Schluss ist nicht zwingend. Wir wissen, dass die Intensität der tektonischen Beanspruchung zum Vorland hin abnimmt. Wenn sich der Flysch in das Vorland hineinschiebt, muss er schliesslich in ein weniger beanspruchtes Gebiet gelangen.

B.KORDIUK (1938) vermutet, dass die Alpen kaum mehr als einen Kilometer auf die Molasse aufgeschoben sind.

F. TRAUB (1948) vertritt die Auffassung, dass im Ostalpenbereich, im Gebiet der Salzach, der Flysch von einer etwa 1000m mächtigen Molassedecke verhüllt gewesen sein müsse. Erst im Helvet hob sich der Alpenrand flexurartig gegen die Molasse heraus. Das führte zur Abtragung der Molassedecke und des grössten Teils des Helvetikums, sodass der Flysch frei wurde. Wir hätten also auch an der Basis der subalpinen Molasse Flysch und Helvet zu erwarten.

P. SCHMIDT-THOMÉ (1949) hält es aber wieder für sehr wahrscheinlich, dass auch unter dem Helvet Molasse anzutreffen ist. Als Hinweis dafür betrachtete er ein in der Bohrung Bocksleiten in 700m erbohrtes jodhaltiges Wasser. Die Bohrung durchteufte bis zu ihrer Endteufe von 1045m nur helvetische Schichten. Dazu ist zu sagen, dass das jodhaltige Wasser nicht unbedingt von unten in das Helvetikum eingedrungen sein muss. Es kann auch, und das scheint mir hier wahrscheinlicher, aus der seitlich angrenzenden Molasse stammen.

E. KRAUS bezweifelt die Aufschiebung des Flyschs auf die Molasse. Die steilen Kontakte zwischen Molasse und Alpin könnten ebenso durch vertikale Bewegungen des Alpenkörpers erklärt werden. Derartige Bewegungen haben zweifellos stattgefunden. Bei der Erklärung der Tektonik der Molasse und des Flyschs wird man jedoch auf die Annahme horizontaler Verschiebungen nicht ganz verzichten können.

Nach dem Fündigwerden einiger Bohrungen im Gebiet der ungefalteten Molasse (Ampfing u. Heimertingen) verlor die Verknüpfung zwischen Ölhöflichkeit und Alpenrandtektonik vorübergehend etwas an Bedeutung. Man wusste zunächst, dass in der Molasse nutzbare Ölvorkommen vorhanden sind und bemühte sich um die Auffindung von Ölfallen. Im Bereich der gefalteten Molasse ist die Auffindung geeigneter Stukturen zwar nicht allzu schwierig, es dürfte hier jedoch meist an hinreichend grossen Stauräumen fehlen, die das Niederbringen von Sonden wirtschaftlich werden lassen. Als Ölträger kommen die bereits erwähnten Bausteinschichten und wahrscheinlich auch die Sandsteine der Deutenhausener-Schichten in Betracht. Letztere liegen an der Basis der Molasse und sind im Hangenden durch die bis über 1000m mächtigen fast undurchlässigen Tonmergel-Schichten verschlossen.

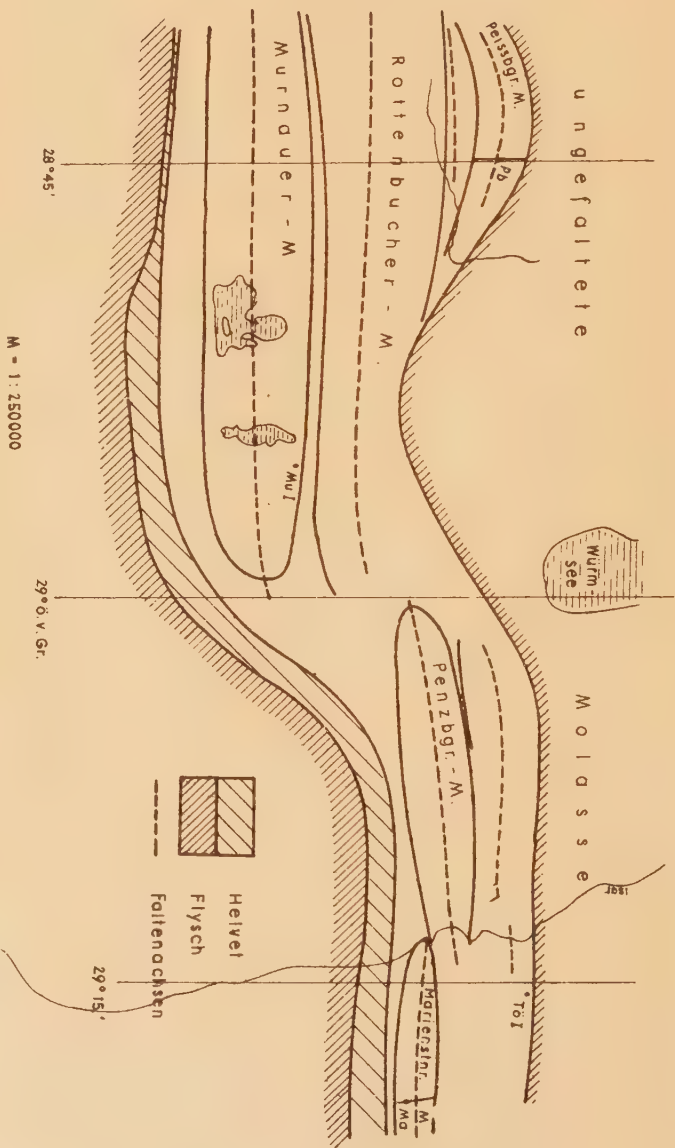


Abb. 1 Übersicht über die gefaltete Molasse zwischen Peitsenberg und Marienstein.

Zur Frage des Untergrundes der gefalteten Molasse lässt sich noch nicht viel sagen. Im Bereich der ungefalteten Molasse wurde an mehreren Stellen ein oberkretazischer, zum Alpenrand hin zunehmend einfallender Untergrund festgestellt (ELBERS-KIRCH W. & LEMCKE K. 1955). Seismische Messungen in der ungefalteten Molasse lassen eine Teufe von 3000 - 4000 m u.NN für die Molassebasis bei Tölz vermuten. In der Gegend von Peissenberg erhielt man Reflexionen aus ca. 3000 m u.NN, die wahrscheinlich auch zur Molassebasis gehören (CLASEN G. & DOHR G. 1958). In welchem Umfang das Liegende der Molasse in die Faltung mit einbezogen wurde und um welche Schichten es sich dabei handelt konnte bisher nicht eindeutig geklärt werden. Es wird vermutet, dass Schichten in der Fazies des Helvetikums vorliegen.

Auf weitere Probleme, zu denen aufgrund der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen Stellung genommen werden kann, möchte ich erst in einem abschliessenden Kapitel eingehen. Es sind dies das Geschwindigkeitsproblem, der Sedimentationsvorgang, der Faltungsvorgang, Faziesunterschiede und die Porosität.

Die U N T E R S U C H U N G der P R O B E N

C h e m i s c h e A n a l y s e n

Neben den Dichte- und Porositätsmessungen, die im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben werden, wurden an fast allen Proben deren Gehalt an CaO , MgO und der Glühverlust bestimmt. Von mehreren Proben wurde die Korngrößenfraktion 66 ausgewogen und in einigen Fällen die Menge des geglühten, unlöslichen Rückstands und den in Lösung gegangenen Eisens ermittelt. Einen Überblick über alle durchgeführten Bestimmungen soll das in Abb. 2 dargestellte Schema vermitteln.

Eine direkte Bestimmung des Gehaltes der Proben an reinen Tonmineralien konnte nicht durchgeführt werden, es wird jedoch später gezeigt werden, dass die Menge des in den Proben vorhandenen Konstitutionswassers eine gewisse Abschätzung des Tongehaltes erlauben dürfte. Als Konstitutionswasser wird dabei die Differenz zwischen Glühverlust und dem aus dem Ca/Mg -Gehalt errechneten CO_2 -Gehalt angesehen.

Die Deutung des Eisengehaltes ist, zumal zwei- und dreiwertiges Eisen nicht getrennt wurden, problematischer Natur. Stichproben zeigten, dass der Grossteil des Eisens in dreiwertiger Form vorhanden ist. Durch Kochen des schon geglühten, schwerlöslichen Rückstands in konzentrierter Salzsäure konnten verschiedentlich noch bis zu 8% Fe_2O_3 aus der Probe herausgelöst werden. Die in den Tabellen angegebenen Eisenwerte sind also nicht der Eisengehalt, sondern lediglich die Menge des bei der Auflösung des Kalkes und Dolomits mit in Lösung gegangenen Eisens.

Die Korngrößenfraktion 66, die in den Tabellen mit Psammit bezeichnet wird, bezieht sich nur auf die Nicht-Carbonate. Sie besteht in der Hauptsache aus Quarz, Feldspäten und Glimmern. Glaukonit kommt verschiedentlich vor.

Calcium und Magnesium wurden nach der von G. MÜLLER (1956) beschriebenen Methode durch Titration mit dem Dinatriumsalz der Athylendiamintetraessigsäure bestimmt.

Alle Zahlenangaben sind auf das absolut trockene Gestein bezogen. Die Luftfeuchtigkeiten wurden gesondert bestimmt.

Ca. 1,5 g lufttrocken, gepulverte Substanz mit verdünnter HCl bei ca. 40°C behandeln bis keine Blasen (CO ₂) mehr aufsteigen		
R: schwerlösli.u.unl.Mineral.	L: Ca, Mg, Fe, Mn	
bei 850°C veraschen	+ Ammoniak	
SCHWERLÖSL. RÜCKSTAND	N: Fe, Mn	L: Ca, Mg
	gl.b.850°C	titr.
	Fe ₂ O ₃ , MnO	CaO, MgO

Ca. 2 g lufttrockene Substanz bei 110°C 3. Stunden trocknen		Ca. 80-100g im Stück in Wasser und in Toluol hängend wiegen
HAFTW.	absol.trockene Subst.	REINDICHTE
	glühen b. 850°C	POROSITÄT
GLÜHRSTD.	CO ₂ , H ₂ O	ROHDICHTE

Zusammenstellung der an den Proben ausgeführten Bestimmungen. R = Rückstand, L = in Lösung, N = Niederschlag;

Die Bestimmung der Porosität und Reichthe.

1.) A l l g e m e i n e s. Bei den meisten heute angewandten Methoden der Porositätsbestimmung wird die Menge einer Flüssigkeit gemessen, die man in die Porenräume eines Probenstückes eindringen lassen konnte. Es liegt auf der Hand, dass auf diese Weise immer nur die Porenräume erfasst werden können, die mit der Aussenwelt, d.h. mit der Oberfläche des Probenstückes in Verbindung stehen. Man unterscheidet deshalb die a b s o l u t e und die e f f e k t i v e Porosität (Nutzporosität). Nur die letztere ist für den Erdölgeologen von Bedeutung. Nur die offenen Poren erlauben eine normale Ölförderung.

Misst man die Porosität auf die obenerwähnte Weise, so muss man sich darüber im Klaren sein, dass neben den auch im natürlichen Gestein offenen Poren auch die Poren erfasst werden, die durch die Heraustrennung des Probenstückes aus seinem natürlichen Verband aufgerissen wurden. Wie gross der Einfluss dieser neu aufgerissenen Poren auf das Messergebnis ist, lässt sich kaum bestimmen. Er wird von Gestein zu Gestein sehr verschieden sein. In der gefalteten Molasse dürfte der Unterschied aber nicht allzu gross sein. Die starke mechanische Beanspruchung der Schichten während der Verfaltung führte sicherlich zu einer weitgehenden Verbindung der Porenräume untereinander.

Die Bestimmung der aufgenommenen Flüssigkeitsmenge kann so erfolgen, dass man zunächst die trockene Probe und dann die mit Flüssigkeit gefüllte Probe wiegt. Zumal bei geringen Porositäten ist aber der durch die an der Oberfläche anhaftenden Flüssigkeit entstehende Fehler oft grösser, als die Porosität selbst. Wegen der dauernden Abdunstung der Flüssigkeit während der Wägung ist die Probe in einem verschlossenen Wägegläschen zu wiegen.

Bei der im folgenden beschriebenen Methode werden die Poren mit einer in der Messflüssigkeit unlöslichen und mit ihr nicht mischbaren Flüssigkeit unterschiedlicher Dichte gefüllt. Die Füllflüssigkeit hat im Verhältnis zur Luft eine viel geringere

Kompressibilität und eine grosse Haftspannung. Der Messflüssigkeit wird es deshalb kaum gelingen, die Füllflüssigkeit aus den Poren zu verdrängen.

2.) Beschreibung der Messmethode. Das beim Füllen der Proben früher übliche "Auskochen" wurde durch ein Verfahren ersetzt, bei dem die Porenluft vor dem Eindringen der Füllflüssigkeit aus der Probe entfernt wird. Die eindringende Flüssigkeit und die austretende Porenluft behindern sich so nicht gegenseitig. Der Einfluss der noch in den Poren verbleibenden Luft ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Nach BOYLE-MARIOTTE verhalten sich die Volumina eines Gases umgekehrt, wie die Drucke. Hat man die Porenluft bis auf 20 mm Hg entfernt, so schrumpft unter Normaldruck das Volumen der noch in den Poren verbliebenen Luft auf $20/760 = 1/38$ des Volumens bei 20 mm Hg zusammen. Der Fehler macht also ungefähr 2,6% der Porosität aus. Bei einem Gestein, dessen Porosität mit 20% bestimmt wurde, wäre die wirkliche Porosität 20,5%.

Als Flüssigkeiten wurden Toluol und Wasser zur Messung verwendet. Sie sind nicht mischbar. In 100 g Wasser lösen sich nur 0,058 g Toluol. Die Dichten verhalten sich wie 1:0,865. Der Siedepunkt des Toluols liegt bei 110°C. Es ist kein übermässiges Erhitzen der Proben beim Austreiben des Toluols nötig.

Zur Messung wird ein ca. 80 g schweres Probenstück bei 115°C 3 Stunden lang getrocknet. Nach dem Abkühlen im Vacuum wird es gewogen und anschliessend auf den Boden des Exsiccators, der in Abb. 3 dargestellten Apparatur gelegt. Die Apparatur besteht aus einer Vacuumanlage, d.h. einer Wasserstrahlpumpe, einer Waschflasche und einem Manometer, einem Exsiccator mit aufgesetztem Dreiweghahn und einer Toluolflasche mit Steigrohr. Zunächst wird die Luft aus dem Exsiccator entfernt. Nach ca. 1 1/2 Stunden bzw. 1/2 Stunde nachdem der Druck im Exsiccator seinen niedrigsten Wert erreicht hat, lässt man das Toluol durch das Steigrohr in den evakuierten Exsiccator einströmen, bis die Probe ganz mit Toluol bedeckt ist. Dann öffnet man den Exsiccator, bis wieder Normaldruck herrscht. Nach ca. 16 Stunden wird die Probe herausgenommen und anschliessend zuerst in Toluol

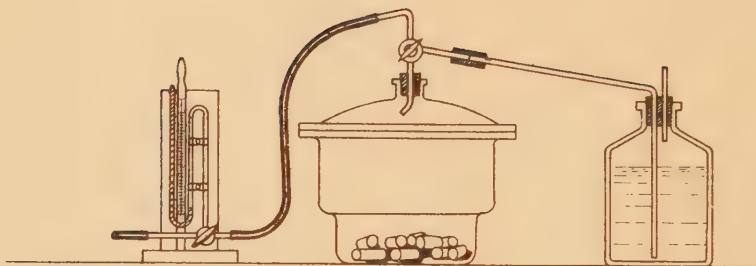


Abb. 3 Apparatur zur Bestimmung von Reindichte und Porosität an Gesteinen.

und dann in Wasser hängend gewogen. Enthielt die Probe quellfähige Tone, so ist Salzwasser dem gewöhnlichen Wasser vorzuziehen.

Nach diesen beiden Wägungen wird die Probe unter den gleichen Bedingungen getrocknet, wie zu Beginn der Messung und ihr Trockengewicht noch einmal bestimmt. Diese Wägung ist nur dann nötig, wenn beobachtet wurde, dass während der Messung Stückchen von der Probe abbröckelten. War dies nicht der Fall, so ist die Porositäts- und Dichtemessung mit dem Wiegen der Probe in Wasser beendet. Die Dichte des Wassers und des Toluols wird am besten durch Wägung eines porenfreien geeichten Körpers in Wasser, Toluol und in Luft bestimmt.

3.) Die Berechnung der Reindichte und Porosität. Es wurden der Reihe nach bestimmt:

G_l = Gewicht der trockenen Probe in Luft

G_t = Gewicht der mit Toluol gefüllten Probe in Toluol

G_w = Gewicht der mit Toluol gefüllten Probe in Wasser

w = Dichte des Wassers

t = Dichte des Toluols

Nach dem Archimedesschen Gesetz entspricht der scheinbare Gewichtsverlust eines in eine Flüssigkeit getauchten Körpers dem Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge.

Es gilt also

$$(I) \quad G_1 - G_t = V \cdot t$$

wenn V das Volumen des Körpers ist und von den Poren abgesehen wird.

Seine Dichte ist dann

$$(II) \quad s_1 = G/V = \frac{G_1 \cdot t}{G_1 - G_t}$$

Berücksichtigt man die Luftdichte, so muss an diesen Wert eine Korrektur angebracht werden.

Ist l die Dichte der Luft, so erhält die in Luft gewogene Probe einen Auftrieb A_1 . Für ihn gilt Analog zu Gl. I

$$A_1 = V \cdot l$$

Das wahre Gewicht der Probe ist

$$G = G_1 + A_1$$

Die auf das Vacuum bezogene Dichte ist

$$s = \frac{G_1}{V} + \frac{V \cdot l}{V}$$

Das Volumen ist aber

$$V = \frac{G_1 + V \cdot l - G_t}{t}$$

oder

$$V = \frac{G_1 - G_t}{t - l}$$

daraus ergibt sich für die auf das Vacuum bezogene Dichte

$$s = s_1 - \left(\frac{G_1}{G_1 - G_t} - 1 \right) \cdot l$$

Das Korrekturglied bewegt sich bei den hier auftretenden Gesteinsdichten um $0,003 \text{ g/cm}^3$.

Besteht der eingetauchte Körper aus der Gesteinsmasse und dem in den Poren befindlichen Toluol und wird er in Wasser hängend gewogen, so gilt entsprechend der Gl. I

$$(III) \quad p \cdot t + G - G_w = (V + p) \cdot w$$

p = Volumen der in der Probe enthaltenen Poren in cm^3 .

$p \cdot t + G$ ist das Gewicht der mit Toluol vollgesogenen Gesteinsprobe. Zieht man davon das Gewicht der in Wasser hängenden Probe ab, erhält man die Auftrieb. Dieser ist aber gleich dem verdrängten Wasservolumen, multipliziert mit der Wasserdichte, also dem Gewicht des verdrängten Wassers.

Wird für V der Ausdruck A_t/t eingesetzt, wobei A_t der Auftrieb der in Toluol hängenden Probe, also $G - G_t$ ist und führt man für $G - G_w$ die Bezeichnung A_w ein und setzt

$$p = P \cdot V / (100 - P)$$

(P ist die Porosität des Gesteins in %)

so gelangt man zu der Berechnungsformel für die Porosität.

$$(IV) \quad P = \frac{A_w - A_t \cdot w/t}{A_w - A_t} \cdot 100$$

Zur Ermittlung von w/t wurde ein porenfreier Körper in Wasser und in Toluol gewogen. Für ihn setzt man $P = 0$ und erhält aus Gleichung IV das Verhältnis der beiden Dichten

$$(V) \quad w/t = A_w/A_t$$

Die Division von Zähler und Nenner der rechten Seite von Gleichung IV durch A_w gibt die Porosität als Funktion des Verhältnisses der beiden Auftriebe an. Die Porosität lässt sich dann als Kurve in ein Diagramm eintragen, dessen Abszisse das Verhältnis der beiden Auftriebe und dessen Ordinate die Porosität ist. Die Berücksichtigung der Luftdichte ist hier überflüssig, da sich ihr Einfluss weitgehend ausgleicht.

4.) Berechnungsbeispiele. In Abb. 4 ist die Porosität als Funktion des Verhältnisses der beiden Auftriebe dargestellt. Die Kurve gilt für $t/w = 0,8650$.

Eine Probe mit dem Gewicht in Luft $G_l = 80,248 \text{ g}$
 hatte in Toluol hängend das Gewicht $G_t = 54,818 \text{ g}$
 und in Wasser hängend das Gewicht $G_w = 50,646 \text{ g}$

Die Auftriebe waren also $G_l - G_t = A_t = 25,430 \text{ g}$
 $G_l - G_w = A_w = 29,602 \text{ g}$

Das Verhältnis A_t/A_w ist 0,85910

Für diesen Wert liest man aus der Kurve ab $P = 4,9\%$
 =====

Verwendet man keine Porositätskurve, so ist es zweckmässig, die Berechnung möglichst einfach und übersichtlich zu gestalten und sich dabei ein bestimmtes Rechenschema anzugewöhnen. Dieses soll so eingerichtet sein, dass alle Zahlen nur einmal angeschrieben zu werden brauchen. Das kann auf folgende Weise geschehen:

Probe-Nr. 341

Schema zur Berechnung von Dichte und Porosität

A_t	25,430	P	=====4,9%
h_t	1,000	s	=====2,723 g/cm ³
$A_t - h_t$	24,430	s_l	= 2,726 g/cm ³
$G_t + h_t$	55,818	$\log s_l$	0,43560
G	80,248	$\log t$	0,93651-1
$G + h_w$	51,546	$\log G/A_t$	0,49909
$A_w - h_w$	28,702	$\log G$	1,90444
h_w	0,900	$\log A_t$	1,40535
A_w	29,602	$\log A_w$	1,47132
1,00000	1,00000	$\log A_t/A_w$	0,93403-1
0,99313	0,85910	$\log t/w$	0,93702-1
0,00687	0,14090		0,99701-1

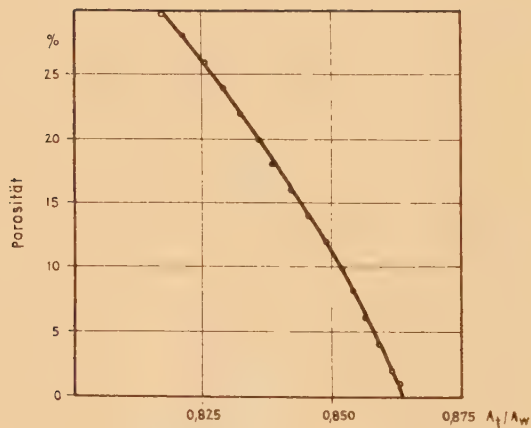


Abb. 4 Die Porosität als Funktion des Verhältnisses zwischen dem Auftrieb der mit Toluol gefüllten Probe in Toluol und dem Auftrieb der mit Toluol gefüllten Probe in Wasser.

Man trägt zunächst in die mit G bezeichnete Zeile das Trockengewicht der Probe ein und schreibt das Gewicht der in Toluol hängenden Probe samt Aufhängung in die Zeile darüber ($G_t + h_t$). Das Gewicht der in Wasser hängenden Probe samt Aufhängung wird in die Zeile darunter geschrieben ($G_w + h_w$). Diese beiden Gewichte zieht man von G ab und addiert die jeweiligen Aufhängungsgewichte. Es wird so A_t und A_w erhalten. Rechts neben A_w wird der Logarithmus von A_w angeschrieben und der Logarithmus A_t darüber gesetzt. Die Differenz der beiden wird entlogarithmiert, links unten angeschrieben und von 1 abgezogen. Die Differenz ist der Nenner der Porositätsformel. Zur Ermittlung des Zählers wird von $\log A_t / A_w$ der $\log t/w$ abgezogen, entlogarithmiert und von 1 subtrahiert. Das Ergebnis ist der Zähler der Porositätsformel. Zähler und Nenner durcheinander dividiert und mit 100 multipliziert ergeben die Porosität. Zur Berechnung der Reindichte schreibt man den $\log G$ über $\log A_t$ an, zieht $\log A_t$ von $\log G$ ab und setzt die Differenz über $\log G$. Zu dieser addiert man den Logarithmus der Toluoldichte und erhält so den Logarithmus der Reindichte. Berücksichtigt man die Luftdichte, so muss von der berechneten Reindichte $0,003 \text{ g/cm}^3$ abgezogen werden.

5.) Die Genauigkeit der Bestimmung. Der geringe Gewichtsunterschied zwischen einer mit Wasser und mit Toluol gefüllten Probe, auf dessen Bestimmung die beschriebene Methode basiert, erfordert genauere Wägungen, als sie bisher zu diesem Zweck üblich waren. Anhand einer Fehlerrechnung für das obenangeführte Beispiel wird nun gezeigt, mit welcher Genauigkeit Dichte und Porosität bestimmt werden können, wenn die Wägungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001 \text{ g}$ durchgeführt werden können, und die Dichte des Toluols bis auf 4 Stellen hinter dem Komma bekannt ist.

Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ist der Fehler die Summe der mit den Messfehlern multiplizierten partiellen Differenzialquotienten der Berechnungsformel.

Die Formel zur Berechnung der Dichte lautet

$$s = \frac{G \cdot t}{G - G_t}$$

Der Fehler ist

$$\Delta s = \frac{G_t \cdot t}{(G - G_t)^2} \Delta G + \frac{G \cdot t}{(G - G_t)^2} \Delta G_t + \frac{G}{G - G_t} \Delta t$$

Da das Gewicht der in Toluol hängenden Probe wegen der Aufhängung durch 2 Wägungen bestimmt werden muss, ist sein Fehler doppelt so gross, wie der des Trockengewichtes und man kann schreiben

$$\Delta s = \frac{t}{(G - G_t)^2} (G_t + 2G) \Delta G + \frac{G}{G - G_t} \Delta t$$

Die entsprechenden Zahlen in diese Formel eingesetzt ergeben als Maximalfehler für ein 80 g schweres Probenstück

$$\Delta s_{\max} = \pm 0,0005$$

Für die Porosität gilt die Formel

$$P = \frac{1 - A_q}{1 - A} \cdot 100$$

$$\text{mit } A = A_t / A_w$$

$$\text{und } q = w/t$$

$$\Delta P = \left\{ \frac{1-q}{(1-A)^2} \Delta A + \frac{A}{1-A} \Delta q \right\} \cdot 100; \Delta A = \frac{A_w + A_t}{A_w^2} \Delta A_t$$

$$\text{da } \Delta A_t = \Delta A_w$$

q wird genauso bestimmt, wie A.
Sein Fehler ist deshalb so gross,
wie der von A.
Aus der obenstehenden Formel er-
rechnet man für die Porosität den
Maximalfehler

Durch Einsetzen der ent-
sprechenden Zahlen erhält
man

$$\Delta P = \pm 0,13\%$$

$$\Delta A = 10^{-4}$$

Die hier berechneten Maximalfehler bleiben innerhalb der für die Praxis erforderlichen Grenzen. Um diese Genauigkeit zu erreichen, muss zu den Wägungen eine Mikrowaage verwendet werden. Dass diese Methode rechnerisch gesehen brauchbare Ergebnisse zu liefern imstande ist, beweist noch nicht, dass sie dies auch wirklich tut. Messungen nach der hier beschriebenen Methode wurden deshalb mit solchen verglichen, bei denen die Probe in Paraffin eingegossen wurde. Ebenso wurde die Reproduzierbarkeit geprüft.

6.) P r ü f u n g d e r M e s s e r g e b n i s s e. In der folgenden Tabelle sind 7 Proben aufgeführt, deren Dichten und Porositäten bereits nach der Eingiessmethode bestimmt worden waren. Die Messungen erfolgten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0025 \text{ g/cm}^3$ für die Reindichte und $\pm 0,9\%$ für die Porosität. Die Messung nach der neuen Methode musste jeweils an einem anderen Stück der Probe vorgenommen werden. Dadurch entstand eine gewisse Unsicherheit durch etwaige Inhomogenitäten des Probenmaterials. Die Betrachtung der Tabelle zeigt jedoch, dass ins Gewicht fallende Unterschiede mit einer Ausnahme kaum vorhanden waren. Probe Nr. 6 zeigt eine ungewöhnlich hohe Abweichung der Porosität. Die Reindichten stimmen gut überein. Diese Probe wurde deshalb noch einmal nach der neuen Methode gemessen und ergab dann die Porosität $P = 3,4\%$ und die Reindichte $s = 2,784 \text{ g/cm}^3$. Damit lag auch die Abweichung der Porosität innerhalb der Fehlergrenze. Wahrscheinlich schwankte die Porosität in dieser Probe verhältnismässig stark.

Es fällt auf, dass die nach der neuen Methode bestimmten Porositäten fast durchwegs höher liegen, als die nach der Eingiessmethode gemessenen (Tab. 1). Das hat wahrscheinlich folgende Ursachen. Beim Eintauchen der Probe in das geschmolzene Paraffin wird die Porenluft erwärmt. Sie dehnt sich aus. Durch die Abkühlung beim Erstarren des Paraffins entsteht ein Unterdruck in den Poren, der möglicherweise einen Teil des Paraffins in die Poren hineinzieht. Obwohl durch die Gegenüberstellung der beiden Messmethoden auch eine gewisse Reproduzierbarkeit der

Messergebnisse erwiesen ist, wurden von zwei Proben je fünf Mehrfachbestimmungen der Porosität und Reindichte durchgeführt. Die Messungen ergaben:

I. Probe Mu 197	Reindichte	Porosität
	<u>g/cm³</u>	<u>%</u>
	+) 2,720	+) 7,6
	2,726	6,5
	2,724	6,3
	2,724	6,2
	2,720	7,2

Die mittlere Schwankung der Reindichte beträgt $\pm 0,002 \text{ g/cm}^3$, die mittlere Schwankung der Porosität beträgt $\pm 0,5\%$.

II. Probe Mu 1506	Reindichte	Porosität
	<u>g/cm³</u>	<u>%</u>
	+) 2,748	+) 4,9
	2,752	9,0
	2,751	8,2
	2,753	8,6
	2,751	8,6

Die mittlere Schwankung der Reindichte beträgt $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, die mittlere Schwankung der Porosität beträgt $\pm 0,3\%$.

+) nach der Eingießmethode gemessen.

Probe Nr.	Porosität %			Reindichte g/cm ³		
	E	N	D	E	N	D
Mu 128	3,9	4,8	+0,9	2,730	2,732	+0,002
Mu 198	5,5	5,4	-0,1	2,720	2,722	+0,002
Mu 200	7,4	7,6	+0,2	2,734	2,729	-0,005
Tö 459	0,8	1,2	+0,4	2,776	2,776	0,000
MaNr.5	2,7	3,4	+0,7	2,790	2,783	-0,007
MaNr.6	2,0	4,1	+2,1	2,785	2,786	+0,001
		(3,4)	(+1,4)		(2,784)	(0,001)

Tab. 1 Vergleich der nach verschiedenen Methoden bestimmten Porositäten und Reindichten. Die Werte der mit E bezeichneten Spalten wurden durch "Auskochen" der Proben im Vacuum und Eingießen in Paraffin ermittelt. Unter N stehen die nach der neuen Methode gemessenen Werte. In den Spalten D sind die Abweichungen der beiden Messwerte voneinander angegeben.

Bei den Mehrfachbestimmungen an den Proben Mu 197 und Mu 1506 liegen alle Werte bis auf eine Reindichte der ersten Probe innerhalb der oben angegebenen Fehlergrenzen. Die Übereinstimmung

der Werte beweist, dass die Messungen nach dieser Methode mit der berechneten Genauigkeit durchgeführt werden können.

7.) B e m e r k u n g e n z u r A u s w e i t u n g d e s V e r f a h r e n s a u f d i e D u r c h l ä s s i g k e i t s m e s s u n g. Die durch ein poröses Gestein strömende Flüssigkeitsmenge ist proportional der durchströmten Fläche, dem Druckgefälle und der Fliesszeit und umgekehrt proportional der Viskosität der strömenden Flüssigkeit und der Dicke der durchströmten Gesteinsschicht. Die Proportionalitätskonstante heisst die Durchlässigkeit, oder die Permeabilität. Ihre Einheit heisst 1 Darcy. Ihre Dimension ist cm^2 (1 Darcy = $1,02 \cdot 10^{-8} \text{cm}^2$).

$$(I) \quad v = k \cdot \frac{D \cdot F}{\eta \cdot b} \cdot z$$

v = durchgeflossenes Flüssigkeitsvolumen ccm
 k = Permeabilität gcm
 D = Druckgefälle atü
 F = durchströmte Gesteinsfläche qcm
 z = Fliesszeit sek
 η = Viskosität der Flüssigkeit cP
 b = Dicke der durchströmten Schicht cm

Dringt eine Flüssigkeit von allen Seiten gleichzeitig in ein Gestein ein, so werden der Strömungsquerschnitt und die Dicke der durchströmten Schicht von der bereits eingedrungenen Flüssigkeitsmenge abhängig. Die Art der Abhängigkeit wird durch die Form des Gesteinsstückes bestimmt.

Bei den im Folgenden beschriebenen Messungen wurden zylindrische Probenstücke verwendet.

Wenn r der Radius der Probe ist und h ihre Höhe, so gelten für die Zusammenhänge zwischen dem gefüllten Gesteinsvolumen V , dem eingedrungenen Flüssigkeitsvolumen v , der in diesem Augenblick durchströmten Gesteinsfläche F und der Eindringtiefe b folgenden Beziehungen:

$$(II) \quad V = \pi(2b^3 - (4r+h)b^2 + 2r(r+h)b) \quad ; \quad v = V \cdot P / 100$$

P = Porosität

$$(III) \quad F = 2\pi(r-b)^2 + 2\pi(r-b)(h-2b)$$

Eine Ableitung dieser Gleichungen befindet sich in einem Anhang am Ende dieses Abschnittes.

Während der sehr kurzen Zeit dz dringt in das Gestein die Flüssigkeitsmenge dv ein.

Die Formel I lautet dann

$$(IV) \quad dv(b) = k \cdot \frac{D \cdot F(b)}{\eta \cdot b} \cdot dz$$

Es ist nun nicht schwer nachzuweisen, dass der Differentialquotient $dv(b)/db$ gleich $F(b) \cdot P/100$ ist.

Damit lässt sich die Differentialgleichung IV in folgende Form überführen

$$(V) \quad b \cdot db = k \cdot \frac{100 \cdot D}{\eta \cdot P} \cdot dz$$

Die beiderseitige Integration ergibt, da zur Zeit 0 auch die Eindringtiefe null sein soll

$$(VI) \quad \frac{b^2}{2} = k \cdot \frac{100 \cdot D}{\eta \cdot P} \cdot z$$

=====

Damit ist eine Formel gefunden, die den Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe, der Eindringzeit und der Permeabilität für ein zylindrisches Probenstück bei allseitigem Eindringen der Flüssigkeit beschreibt. Da auch $v(b)$ bekannt ist (Gl.II), kann die Durchlässigkeit eines Gesteins errechnet werden, wenn man feststellt, wieviel Flüssigkeit nach einer bestimmten Zeit in dieses Gestein eingedrungen ist und die Porosität bekannt ist.

Die Bestimmung des eingedrungenen Flüssigkeitsvolumens geschieht auf folgende Weise:

Der Auftrieb der in der Messflüssigkeit hängenden Probe die teilweise mit dieser gefüllt ist, setzt sich zusammen aus dem Gewicht der von der Gesteinsmasse und dem noch nicht gefüllten Porenraum verdrängten Flüssigkeit.

$$(VII) \quad A_z = V_G \cdot t + p_{z-} \cdot t$$

A_z = Auftrieb des Gesteins zur Zeit z

V_G = Volumen der Gesteinsmasse ohne Poren

t = Dichte der Messflüssigkeit

p_{z-} = zur Zeit z noch nicht gefüllter Porenraum

$V_{G.t}$ ist der Auftrieb der vollständig gefüllten Probe.

$$V_{G.t} = A_t = G - G_t$$

G_t = Gewicht der in der Flüssigkeit hängenden vollständig gefüllten Probe

G = Trockengewicht

Damit wird aus G. VII wenn gleichzeitig p_{z-} eliminiert wird

$$p_{z-} = (A_z - A_t) / t$$

Der bereits gefüllte Porenraum $p_{z-} = v_z$ ist gleich der Differenz zwischen dem gesamten im Gestein enthaltenen Porenraum und dem noch nicht gefüllten.

Die Differenz der beiden Auftriebe ist gleich der Differenz der Gewichte G_t und G_z . Dabei kehren sich die Vorzeichen um.

Es gilt also

$$v_z = p - (G_t - G_z) / t$$

Das nach der Zeit z gefüllte Gesteinsvolumen ist

$$(VIII) \quad V_z = 100. (p - (G_t - G_z) / t) / P$$

Es soll nun untersucht werden, ob der Ausdruck $k. \frac{100.D}{\eta.P}$

(Gl. VI) für den ganzen Füllprozess konstant bleibt, das heisst, ob das Eindringen der Flüssigkeit so geschieht, wie es bei der Ableitung der Formel angenommen wurde, nämlich konzentrisch und von allen Seiten gleichmässig und gleich schnell.

Die Prüfung erfolgte an vier Bohrkernen. Der erste hatte einen Durchmesser $d=6,5$ cm und die Höhe $h=2,9$ cm. Er wurde mit Toluol gemessen. Die drei anderen Proben hatten die in der Industrie heute übliche Probenform ($d=2,87$ cm; $h=3$ cm). Frau Dr. Hufmann, von der Fa. Preussag, stellte sie mir freundlicherweise für diese Untersuchung zur Verfügung. Wegen ihrer geringen Grösse verwendete ich für diese Proben das zähflüssigere Rizinusöl. Der Füllprozess verlangsamte sich dadurch wesentlich und konnte besser verfolgt werden. Da die Durchlässigkeit (Luft) dieser Proben bereits gemessen worden war, konnten die hier erzielten Ergebnisse mit der auf die übliche Weise gemessenen Durchlässigkeit verglichen werden. Es sollten hier zunächst nur die Ergebnisse dieser

Untersuchungen widergegeben werden. Die ausführliche Berechnung befindet sich in einem Anhang am Ende dieses Abschnittes.

Für den Ausdruck $k \cdot \frac{100 \cdot D}{\eta \cdot P} = K$ wurden aus den mehrmaligen Wägungen während des Füllprozesses folgende Werte errechnet

Probe Mu 29 mit Toluol gemessen, z in Stunden

z =	0,7	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	(h)
2K =	0,13	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12	(cm ² /h)

Probe Nr. 5 mit Riz. gem.

z =	6,0	16,5	21,0	26,0	31,0	36,0	57,0	(min)
2K =	0,01	0,0090	0,0090	0,0091	0,0093	0,0094	0,011	(cm ² /min)

Probe Nr. 7 mit Riz. gem.

z =	3,0	7,0	12,0	17,0	21,0	30,5	(min)
2K =	0,073	0,063	0,058	0,064	0,071		(cm ² /min)

Probe Nr. 9 mit Riz. gem.

z =	10,0	15,0	20,5	33,0	45,0	60,5	(min)
2K =	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0016	0,0016	(cm ² /min)

Es zeigt sich, dass die für 2K errechneten Werte für die einzelnen Proben nur geringfügig schwanken. Man kann also annehmen, dass die Flüssigkeit tatsächlich so in die Probe eindringt, wie es bei der Ableitung der Formel vorausgesetzt wurde. Wäre dies nicht der Fall, so müsste sich der Wert für 2K im Verlauf des Füllprozesses ändern.

Aus dem Wert von K liesse sich nun nach der Formel

$$k = K \cdot \eta \cdot P / 100 \cdot D$$

die Permeabilität k errechnen, wenn D, der Druck unter dem die Flüssigkeit in das Gestein eindringt bekannt wäre. Da die Flüssigkeit bei der Messung nicht mehr aus den Poren austritt, wird die Wirkung des Kapillardruckes nicht aufgehoben, sondern addiert sich zu der des Atmosphärendruckes.

Die Höhe dieses Kapillardruckes ist vom Durchmesser der durchströmten Poren abhängig. Bei sehr engen Poren kann der Kapillardruck den Druck der Atmosphäre um ein Vielfaches übersteigen. Es ist anzunehmen, dass neben der Porosität und der Rauheit der Porenwände auch die Weite der Poren die Permeabilität eines Gesteins massgeblich beeinflusst. Man wird also erwarten können, dass trotz der grossen Schwankungsmöglichkeit der Grösse D, ein gesetzmässiger Zusammenhang zwischen der Permeabilität k und dem hier ermittelten Ausdruck $100.D.k/\eta.P = K$ besteht.

In der folgenden Tabelle sind die durch die eigenen Messungen bestimmten Werte für das Produkt k.D den im Laboratorium der Fa. Preussag mit Luft gemessenen Permeabilitäten k gegenübergestellt.

Probe	Porosität %	$K(\frac{\text{cm}^2}{\text{min}})$	k.D ($\frac{\text{g.cm}}{\text{sek}^2}$)	k (md)
Nr. 7	16,95 (17,2)	0,032	$8,6.10^{-4}$	91
Nr. 5	26,95 (26,8)	0,0047	$1,98.10^{-4}$	35
Nr. 9	18,90 (19,0)	0,0009	$0,25.10^{-4}$	4,7

Vergleich der durch die eigenen Messungen ermittelten Werte für das Produkt von Permeabilität und Druck (k.D) mit den im Laboratorium der Fa. Preussag mit Luft gemessenen Permeabilitäten.

Die in Klammern aufgeführten Zahlen sind die im Laboratorium der Fa. Preussag mit Tetrachlorkohlenstoff gemessenen Porositäten. Die Permeabilitäten sind in Millidarcy angegeben. $1\text{md} = 10^{-3}\text{Darcy} = 1,02.10^{-11}\text{cm}^2$.

Die Anzahl der verglichenen Werte ist natürlich viel zu gering, um quantitative Aussagen über den Einfluss der Porenweite auf die Permeabilität machen zu können. Es scheint jedoch, als ob der tatsächlich wirksame Druck viel geringer wäre, als der Unterdruck, der beim Evakuieren der Proben erzeugt wurde. Dieser Umstand wäre sicher durch geeignete Variation der Versuchsbedingungen zu klären. Derartige Untersuchungen würden jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Ich will mich deshalb hier nur mit der Feststellung begnügen, dass die Grösse K tatsächlich mit zunehmender Permeabilität wächst und für jedes Gestein, dessen Poren keine besondere Richtung bevorzugen eine Konstante ist.

Gelingt es, eine Kurve zu finden, die den Zusammenhang zwischen K und der Permeabilität eindeutig beschreibt, so wäre es möglich,

durch nur eine zusätzliche Wägung zusammen mit der Porosität die Permeabilität eines Gesteins zu messen. Zur Bestimmung höherer Permeabilitäten wäre es zweckmässig, grössere Probenstücke zu verwenden, als dies jetzt üblich ist. Der Ansaugprozess könnte so verlängert werden und wäre dann besser zu beobachten. Besitzen alle Proben die gleiche geometrische Form und die gleichen Ausmasse, so ist die Funktion $V(2Kz)$ nur ein einziges Mal zu berechnen und gilt dann für alle Proben.

Die gute Übereinstimmung der mit Rizinusöl und mit Tetrachlorkohlenstoff gemessenen Porositäten zeigt, dass die Porositätsmessung durch die Verwendung einer anderen Flüssigkeit nicht beeinträchtigt wird.

7a) A n h a n g

Wenn die Messflüssigkeit von allen Seiten gleichmässig in ein zylindrisches Probenstück eindringt, so ist das gefüllte Gesteinsvolumen, wenn die Flüssigkeit b cm in das Gestein eingedrungen ist

$$V = r^2\pi h - (r-b)^2\pi(h-2b) \quad ; \quad r=\text{Radius}; \quad h=\text{Höhe} \\ = \pi(r^2h - r^2h + 2r^2b + 2rbh - 4rb^2 - b^2h + 2b^3)$$

$$1.) \quad V = \pi(2b^3 - (4r+h)b^2 + 2r(r+h)b)$$

Für den Differentialquotienten dV/db gilt

$$2.) \quad \frac{dV}{db} = \pi(6b^2 - 2(4r+h)b + 2r(r+h))$$

Die Grenzfläche zwischen gefülltem und ungefülltem Gestein in der Probe ist

$$F = 2(r-b)^2\pi + 2(r-b)\pi(h-2b) \\ = \pi(2r^2 - 4rb + 2b^2 + 2rh - 4rb - 2bh + 4b^2)$$

$$3.) \quad F = \pi(6b^2 - 2(4r+h)b + 2r(r+h))$$

Diese Grenzfläche ist also gleich der Ableitung des gefüllten Volumens V nach der Eindringtiefe b .

Zur Berechnung der Funktionen $V(b)$ für die Proben Nr. 5, Nr. 7 und Nr. 9 wurde die Gleichung 1 etwas umgestellt. Da diese Proben alle den gleichen Durchmesser hatten, sich aber in der Höhe unterschieden, wurde für sie der von der Höhe unabhängige Teil der Formel gemeinsam berechnet. Gleichung 1 wurde in die Form gebracht

$$4.) \quad V = \pi(2b^3 - 4rb^2 + 2r^2b + (2rb - b^2)h)$$

Berechnung der Funktionen $V_z(b)$

Probe $Mu\ 29$

$r = 3,25\text{ cm}$; $h = 2,90\text{ cm}$; $4r+h = 15,90\text{ cm}$; $2r(r+h) = 40,00\text{ cm}$

b	$=$	0,447	0,632	0,775	0,894	1,000	1,095	1,225	1,414
b^2	$=$	0,200	0,400	0,600	0,800	1,000	1,200	1,500	2,000
b^3	$=$	0,090	0,252	0,465	0,715	1,000	1,315	1,835	2,825

I	$=$	0,180	0,504	0,930	1,430	2,000	2,630	3,670	5,650
II	$=$	17,90	25,30	31,00	35,80	40,00	43,80	49,00	56,60
		18,08	25,80	31,93	37,23	42,00	46,43	52,67	62,25
III	$=$	3,18	6,36	9,54	12,72	15,90	19,09	23,81	31,80
IV	$=$	14,90	19,44	22,39	24,51	26,10	27,34	28,86	30,45
V_z	$=$	46,10	61,00	69,20	75,85	80,85	84,70	89,35	94,30

$I = 21,^3$; $II = 40,0\text{ b}$; $III = 15,9\text{ b}^2$; $IV = V_z/\pi$

Proben Nr. 5, Nr. 7 und Nr. 9

$r = 1,44\text{ cm}$; $h_5 = 2,01\text{ cm}$; $h_7 = 3,01\text{ cm}$; $h_9 = 2,58\text{ cm}$

b	$=$	0,1414	0,223	0,316	0,500	0,700	1,000	1,200	1,400
b^2	$=$	0,020	0,050	0,10	0,25	0,49	1,00	1,44	1,96
b^3	$=$	0,0028	0,0121	0,032	0,125	0,342	1,00	1,728	2,740

I	$=$	0,0056	0,0242	0,064	0,250	0,684	2,00	3,456	5,480
II	$=$	+0,5885	0,928	1,315	2,080	2,910	4,160	4,995	5,825
III	$=$	-0,1150	0,287	0,575	1,437	2,815	5,745	8,280	11,270
A	$=$	00,4791	0,665	0,803	0,893	0,777	0,415	0,171	0,035

IV	$=$	0,4065	0,641	0,908	1,438	2,012	2,875	3,450	4,025
l^2	$=$	+0,0200	0,050	0,100	0,250	0,490	1,000	1,440	1,960
B	$=$	0,3865	0,591	0,808	1,188	1,522	1,875	2,010	2,065

Bh_5	$=$	2,440	3,730	5,100	7,500	9,615	11,850	12,651	13,040
A ⁵	$=$	1,505	2,090	2,520	2,800	2,440	1,310	0,537	0,110
V_z	$=$	3,945	5,820	7,260	10,300	12,055	13,160		
V_{k5}	$=$	3,855	5,69	7,45	10,06	11,76	12,855		

Bh_7	$=$	3,655	5,585	7,640	11,230	14,390	17,75	19,00	19,53
A ⁷	$=$	+1,505	2,090	2,520	2,800	2,440	1,310	0,537	0,110
V_z	$=$	5,160	7,675	10,160	14,030	16,830	19,060	19,537	19,640
V_{k7}	$=$	5,030	7,48	9,90	13,68	16,40	18,58	19,04	19,15

Bh_9	$=$	3,132	4,790	6,550	9,625	12,34	15,20	16,25	16,74
A ⁹	$=$	+1,505	2,090	2,520	2,800	2,440	1,31	0,54	0,11
V_z	$=$	4,637	6,880	9,070	12,425	14,78	16,51	16,79	16,85
V_{k9}	$=$	4,643	6,892	9,085	12,450	14,80	16,54	16,82	16,89

Die Zeile V_{kn} gibt die korrigierten Volumina an. Das aus den Ausmassen der Proben errechnete Volumen der Probe ist meistens von dem durch die Auftriebsmessung ermittelten etwas verschieden. Die Korrektur erfolgte so, dass sich das korrigierte Teilvolumen zum berechneten Teilvolumen so verhält, wie das durch die Auftriebsmessung ermittelte Gesamtvolumen zum berechneten Gesamtvolumen.

Die übrigen Zeilen bedeuten:

$$\begin{aligned} I &= 2b^3 & A &= 2b^3 - 4rb^2 + 2r^2b \\ II &= 2r^2b & B &= 2rb - b^2 \\ III &= 4rb^2 \\ IV &= 2rb \end{aligned}$$

Die Eindringtiefe b ist mit der Permeabilität durch die Gl. VI (im Text) verknüpft. Wählt man bei der Darstellung der Funktion $V(b)$ statt b das Quadrat von b als Abszisse, so erhält man eine Kurve, die den Zusammenhang zwischen dem gefüllten Gesteinsvolumen und der Grösse $2Kz$ darstellt. K bedeutet hierbei $100kD/P$.

Die Ermittlung der Werte von $2K$ für die einzelnen Proben.

Bei den nachstehenden Rechnungen wurden folgende Abkürzungen verwendet.

- G = Gewicht der trockenen Probe in Luft
 - R = Gewicht des den ganzen Porenraum füllenden Rizinusöls
 - p = der in der Probe vorhandene Porenraum (cm^3)
 - P = Porosität in %
 - G_r = Gewicht der in Rizinusöl hängenden, vollgefüllten Probe
 - A_r = Auftrieb der in Rizinusöl hängenden vollgefüllten Probe
 - V_g = Das von der Gesteinsmasse eingenommene Volumen ohne Porenraum
 - V = das Volumen der Probe mit Poren
 - G_w = das Gewicht der mit Toluol gefüllten Probe in Wasser
 - G_t = das Gewicht der mit Toluol gefüllten Probe in Toluol
 - A_w = Auftrieb der mit Toluol gefüllten Probe in Wasser
 - A_t = Auftrieb der mit Toluol gefüllten Probe in Toluol
 - t = Dichte des Toluols = $0,86035 \text{ g/cm}^3$
 - w/t = Verhältnis der Dichte des Wassers zur Dichte des Toluols = $1,15975$
 - z = Eindringzeit, für die Proben Nr. 5, Nr. 7 u. Nr. 9 in Minuten, für die Probe Mu29 in Stunden
 - G_z = Gewicht der z Minuten (Stunden) in Rizinusöl (Toluol) hängenden Probe im Messmedium
 - p_{z-} = zur Zeit z noch nicht gefüllter Porenraum in cm^3
 - p_{z+} = zur Zeit z bereits gefüllter Porenraum in cm^3
 - V_z = zur Zeit z bereits gefülltes Probenvolumen in cm^3
- Dichte des Rizinusöls = $0,949 \text{ g/cm}^3$

Probe Mu29

Messfl.: Toluol

$$G = 254,83 \text{ g}$$

$$G = 164,26 \text{ g}$$

$$G_t^w = 175,30 \text{ g}$$

$$A = 92,57 \text{ g}$$

$$A_t^w = 79,53 \text{ g}$$

$$p = 2,47 \text{ cm}^3$$

$$P = 2,61 \%$$

$$V = 94,90 \text{ cm}^3$$

z =	0,7	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
G _t =	175,30	175,30	175,30	175,30	175,30	175,30	175,30
G _z =	-174,00	174,10	174,37	174,51	174,63	174,72	174,80
	1,30	1,20	0,93	0,79	0,67	0,58	0,50
p _{z-} =	1,50	1,39	1,08	0,91	0,77	0,67	0,58
	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
p _{z+} =	0,97	1,08	1,40	1,56	1,70	1,80	1,89
V _z =	37,20	41,40	53,70	59,80	65,20	69,00	72,50
2K _z =	0,12	0,15	0,285	0,405	0,52	0,60	0,71
K =	0,0655	0,075	0,071	0,0675	0,065	0,060	0,060

Probe Nr. 5

Messfl.: Rizin.

$$G = 25,2030 \text{ g}$$

$$G+R = 28,4897 \text{ g}$$

$$R = 3,2867 \text{ g}$$

$$p = 3,465 \text{ cm}^3$$

$$P = 26,95 \%$$

$$G = 25,2030 \text{ g}$$

$$G = 16,2942 \text{ g}$$

$$A_r = 8,9088 \text{ g}$$

$$V_g = 9,390 \text{ cm}^3$$

$$V = 12,855 \text{ cm}^3$$

z =	6,0	16,5	21,0	26,0	31,0	36,0
G _r =	16,2942	16,2942	16,2942	16,2942	16,2942	16,2942
G _z =	-14,6266	15,2226	15,3966	15,5377	15,6741	15,7928
	1,6676	1,0716	0,8976	0,7565	0,6201	0,5014
p _{z-} =	1,755	1,129	0,945	0,797	0,653	0,528
p =	3,465	3,465	3,465	3,465	3,465	3,465
p _{z+} =	1,710	2,336	2,520	2,668	2,812	2,937
V _z =	6,38	8,70	9,40	9,95	10,48	10,95
2K _z =	0,06	0,145	0,190	0,235	0,290	0,340
K =	0,005	0,0045	0,0045	0,0045	0,0047	0,0047

Probe Nr. 7

Messfl. Rizin.

$$G = 42,8533 \text{ g}$$

$$G+R = 45,9576 \text{ g}$$

$$R = 3,1043 \text{ g}$$

$$p = 3,280 \text{ cm}^3$$

$$P = 16,95 \%$$

$$G = 42,8533 \text{ g}$$

$$G = 27,6228 \text{ g}$$

$$A_r = 15,2305 \text{ g}$$

$$V = 16,05 \text{ cm}^3$$

$$V = 19,33 \text{ cm}^3$$

Nr. 7

z	=	3,0	7,0	12,0	17,0	21,0	30,5
G	=	27,7590	27,7590	27,7590	27,7590	27,7590	27,7590
G ^r	=	<u>-26,7251</u>	<u>27,2195</u>	<u>27,4812</u>	<u>27,6642</u>	<u>27,7299</u>	<u>27,7474</u>
z		1,0339	0,5395	0,2778	0,0948	0,0291	0,0116
p _z ⁻	=	1,092	0,569	0,293	0,100	0,037	0,012
p _z ⁻	=	<u>3,280</u>	<u>3,280</u>	<u>3,280</u>	<u>3,280</u>	<u>3,280</u>	<u>3,280</u>
p _z ⁺	=	2,188	2,711	2,987	3,180	3,243	3,268
V _z	=	12,89	15,99	17,60	18,75	19,11	19,25
2K _z	=	0,22	0,44	0,69	1,08	1,50	
K	=	<u>0,037</u>	<u>0,032</u>	<u>0,029</u>	<u>0,032</u>	<u>0,036</u>	

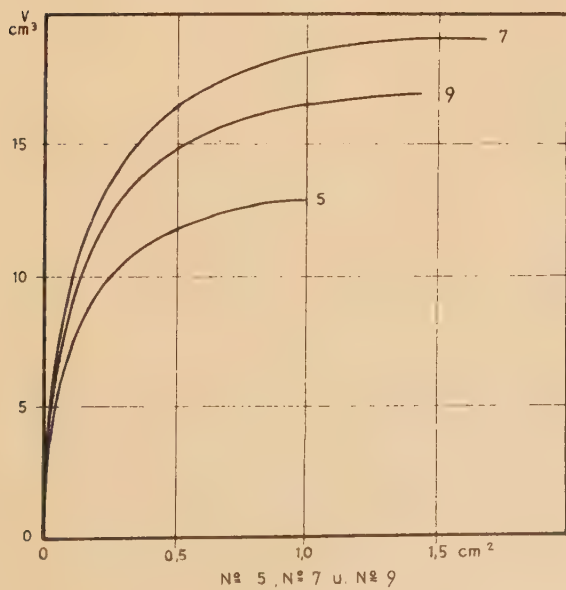
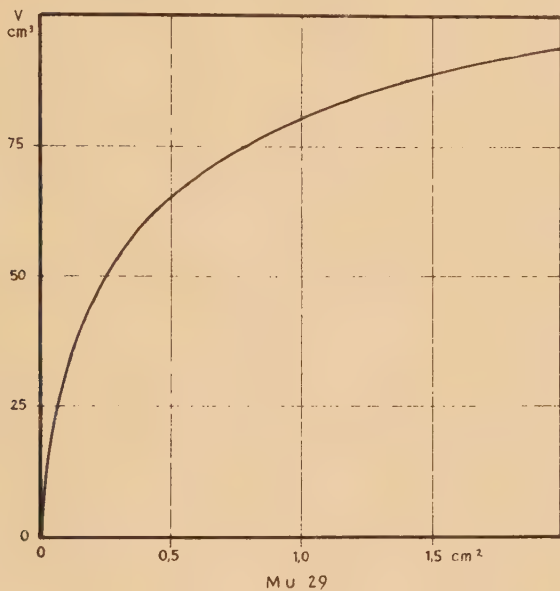
Probe Nr. 9

Messfl.: Rizin.

G	=	36,3510 g	G	=	36,3510 g
G+R	=	<u>39,3345 g</u>	G _r	=	<u>23,5250 g</u>
R	=	2,9835 g	A _r ^r	=	<u>12,8260 g</u>
p	=	3,142 cm ³	V _g	=	13,51 cm ³
P	=	18,9 %	V	=	16,65 cm ³

z	=	10,0	15,0	20,5	33,0	45,5	60,5
G	=	23,5250	23,5250	23,5250	23,5250	23,5250	23,5250
G ^r	=	<u>-21,3068</u>	<u>21,4672</u>	<u>21,5948</u>	<u>21,8330</u>	<u>21,9876</u>	<u>22,1419</u>
z		2,2182	2,0578	1,9302	1,6920	1,5374	1,3831
p _z ⁻	=	2,335	2,168	2,034	1,783	1,620	1,456
p _z ⁻	=	<u>3,142</u>	<u>3,142</u>	<u>3,142</u>	<u>3,142</u>	<u>3,142</u>	<u>3,142</u>
p _z ⁺	=	0,807	0,974	1,108	1,359	1,522	1,686
V _z	=	4,275	5,16	5,87	7,20	8,06	8,93
2K _z	=	0,017	0,025	0,034	0,055	0,074	0,097
K	=	<u>0,00085</u>	<u>0,00084</u>	<u>0,00083</u>	<u>0,00084</u>	<u>0,00082</u>	<u>0,00080</u>

Das durchtränkte Gesteinsvolumen V_z einer zyl. Probe
als Funktion des Quadrates der Eindringtiefe l



Die AUSWERTUNG der MESSUNGEN

Beschreibung der untersuchten Aufschlüsse anhand der Messwerte.

1. Die Tiefbohrung Murnau I

Im Rahmen der erdölgeologischen Erschliessung des Alpenvorlandes wurde von der Firma Preussag in den Jahren 1957/58 nordöstlich von Murnau eine Aufschlussbohrung niedergebracht. Durch das grosszügige Entgegenkommen der Firma Preussag, an dieser Stelle sei insbesondere Herrn Dr. Breyer und Herrn Dr. Beckmann gedankt, konnte ich diese Bohrung in meine Untersuchungen mit einbeziehen.

Die Bohrung erreichte eine Endteufe von ca. 2850 m und wurde alle 50 m gekernt. Sie war so angesetzt, dass sie den zwischen Murnauer- und Rottenbucher-Mulde aufragenden Sattel durchteufte und dort eine aufgrund der vorangegangenen seismischen Untersuchungen vermutete Olfalle in den Baustein-Schichten erreichte. Überraschenderweise blieben die Baustein-Schichten in der Bohrung aus. Sie endete im vermutlich unteren Bereich der Tonmergel-Schichten.

Die Gründe für das Ausfallen der Baustein-Schichten können nur mit dem Vorgang der Verfaltung im Zusammenhang stehen, da die Baustein-Schichten in beiden Muldenschenkeln zweifellos vorhanden sind. Es sei hierzu auf die im Bull. Ver. Schw. Petrol. Geol. u. Ing. 1958 erschienene Arbeit von F. BREYER verwiesen. Möglicherweise rissen an dieser Stelle die Baustein-Schichten ab und zogen sich bei der fortschreitenden Verfaltung auseinander. Ihre verhältnismässig starren Sandsteine konnten, da sie das unterste versteifende Element der verfalteten Schichten bildeten, der Dehnung nicht mehr folgen. In die entstehende Kluft schoben sich von unten her die leicht verformbaren Tonmergel ein und verdrängten den Schutt der Baustein-Schichten. Die an dieser Stelle gezogenen Kerne weisen teilweise um ca. 40° gegeneinander geneigte Gleitflächen auf, die auf eine derarti-

ge Bewegung schliessen lassen. Die seismischen Reflexionen, die man von dort erhielt, stehen zu dieser Auffassung nicht im Widerspruch. Die Reflexionsflächen stehen an dieser Stelle oft quer zu dem erwarteten Schichtverlauf.

B e s c h r e i b u n g d e s B o h r p r o f i l s. Die Bohrung durchteufte von oben nach unten die Oberen Cyrenen-Schichten, die Untere Bunte Molasse, die Unteren Cyrenen-Schichten und die Tonmergel-Schichten.

Von den Oberen Cyrenen-Schichten wurden nur noch die unteren 250 m noch mit erfasst. Sie enthalten dort ungefähr 20% Dolomit und etwa 35% Kalk. An der Grenze zu den Schichten der Unteren Bunten Molasse sinkt ihr Kalkgehalt auf 20% ab. Die durchschnittliche Reindichte beträgt $2,73 \text{ g/cm}^3$, scheint aber mit wachsender Teufe etwas zuzunehmen. Die Porosität der Oberen Cyrenen-Schichten liegt bei etwa 8%.

Der Übergang zur Unteren Bunten Molasse ist durch ein plötzliches Anwachsen des Dolomitgehalts gekennzeichnet. Die Schichten der UBM enthalten im Durchschnitt 50% Dolomit. Die Kalkgehalte bewegen sich um 20%. Sie schwanken zunächst sehr stark. Im unteren Teil der UBM wird die Kalkführung der Schichten etwas geringer (15%). Die Reindichtekurve zeigt drei ausgeprägte Maximas. Ihre Lagen stimmen mit denen der Konglomeratbänke überein. Die hohen Dichten sind durch die starke Dolomitführung der Konglomerate bedingt. Die Dichten der dazwischen liegenden Mergel und sandigen Mergel nehmen mit Annäherung an die Konglomerate beständig zu. Die Sedimentation dürfte also ein ununterbrochener Vorgang gewesen sein, während sich die Transportkraft der schuttliefernden Flüsse und Ströme periodisch veränderte. Der stetige Verlauf der Reindichtekurve lässt sich noch in die Unteren und Oberen Cyrenen-Schichten hinein verfolgen. Irgendwelche Unstetigkeiten in der Kurve, die auf eine Verwerfung, oder das Ausfallen von Schichten hindeuten würden, lassen sich im gesamten Bereich der UBM nicht entdecken. Zwei herausfallende Dichten in 1250 m Teufe gehören zu zwei besonders pyritreichen Proben. Der Pyrit ist hier eine sekundäre Bildung und hat

mit dem eigentlichen Sedimentationsvorgang nichts zu tun.

Der Kalkgehalt der Tonmergel-Schichten schwankt an deren Obergrenze zwischen ca. 12% und 22%. Erst ungefähr 500 m tiefer enden die Schwankungen und der Kalkgehalt bleibt konstant bei ca. 20%. Ähnlich ist es mit der Dolomitführung. Zwischen 1500 m und ca. 2000 m Teufe enthalten die Tonmergel-Schichten zwischen 10% und 30% Dolomit. Unterhalb dieser Zone bleibt der Dolomitgehalt bei 16%. Entsprechend sind auch die Reindichten dort ungefähr konstant bei ca. $2,71\text{g/cm}^3$. Zwischen 1500 m und 2000 m Teufe liegen die Reindichten bei ca. $2,75\text{g/cm}^3$, also etwas höher. Die geschilderten Schwankungen im oberen Bereich der Tonmergel-Schichten und die Zunahme der Dichte deuten schon das Ende der marinen Ara an. Die Küste näherte sich langsam dem Sedimentationsgebiet.

Die Form der Porositätskurve (Abb.7) wird in erster Linie durch die lithologische Beschaffenheit der Gesteine bestimmt. Ein Einfluss des Hangenddruckes und der besonderen Tektonik kann nur vermutet werden.

Die Abnahme der Porosität zwischen 60 m und 1200 m Teufe (Obergrenze der Ob.Cyr.Sch. bis Untergr. UBM) von 9% auf 1% ist sicher nicht allein die Folge des mit der Tiefe wachsenden Hangenddruckes. Dazu ist die Abnahme viel zu schnell. Der Dolomitgehalt nimmt in diesem Bereich zwar von 20% auf 50% zu, doch dürfte er die Porosität kaum in dieser Richtung beeinflussen. Ein derartiger Zusammenhang konnte sonst nirgends im Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass hier der **Faltungsdruck** die Porosität beeinflusst. Der Faltungsdruck kann nur dort pressend wirken, wo ein hinreichend grosser Gegendruck vorhanden ist. Dieser Gegendruck wächst mit der Biegefestigkeit der Schichten und dem Gewicht des Hangenden.

Im Bereich der Unteren Cyrenen-Schichten schwankt die Porosität zwischen 1% und 5%. Der Grund ist sicher die wechselvolle Ausbildung dieser Schichten, wie sie auch bei den Kalk- und Dolomitgehalten zu erkennen ist.

Die verhältnismässig hohen Porositäten der Tonmergel-Schichten

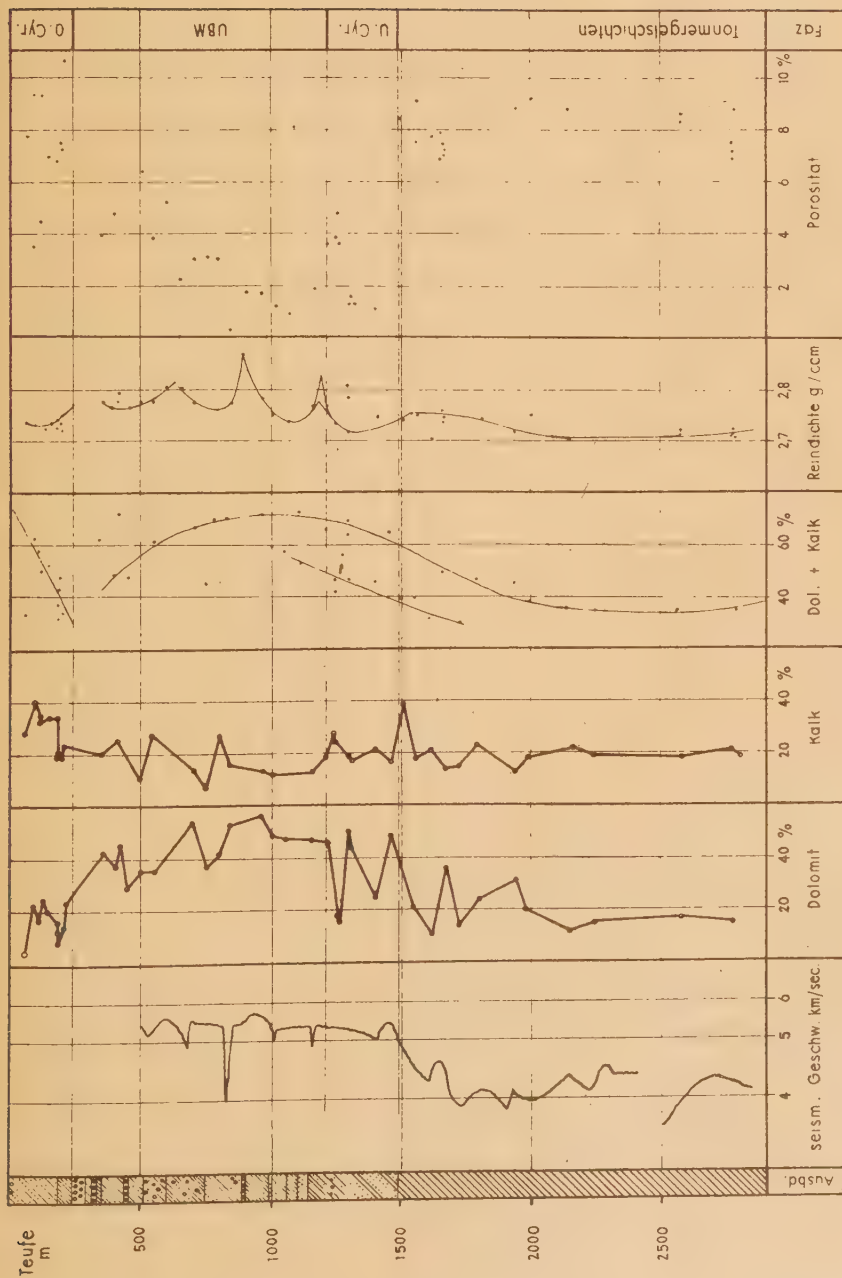


Abb. 7: Tiefbohrung Murnau 1, physikalische und chemische Daten.

(7%-9%) sind, wie später gezeigt werden wird, die Folge hoher Tongehalte. Im unteren Bereich der Tonmergel-Schichten, zwischen 2000 m und 2500 m Teufe, nimmt die Porosität von 9% auf 7% ab. Da sich in diesem Bereich weder der Karbonatgehalt, noch die Dichte wesentlich ändert, ist anzunehmen, dass diese geringe Abnahme der Porosität eine Folge des wachsenden Hangenddruckes ist. Auffallend ist, dass die Porosität an der Obergrenze der Tonmergel-Schichten etwas niedriger ist, als in 2000 m Teufe. Entweder wurden hier die Schichten schon durch den Faltungsdruck gepresst, oder die Porositäten waren wegen des niedrigeren Tongehaltes von vornherein nicht so hoch. Wahrscheinlich aber ist beides der Fall.

Die seismischen Geschwindigkeiten der Tonmergel-Schichten liegen um etwa 1000 m/sek niedriger, als die der Unteren Süßwasser Molasse. Der Hauptgrund dafür ist sicher bei dem im Vergleich zur USM geringen Karbonatgehalt der Tonmergel-Schichten zu suchen. Die UBM enthält im Mittel etwa 70% Karbonat, in den Tonmergel-Schichten wurden aber nur durchschnittlich 40% Karbonat gemessen. Um festzustellen, in welchem Umfang die Porosität die seismische Geschwindigkeit beeinflusst, reicht das vorhandene Material nicht aus. Es wären dazu Geschwindigkeitsmessungen an Einzelproben im Labor nötig.

2. Das Bergwerk Marienstein

Die Marienstein-Haushamer-Mulde gehört, ebenso wie die Murnauer-Mulde, dem südlichsten Faltengürtel der subalpinen Molasse an. Sie beginnt im Westen ungefähr am heutigen Bett der Isar und erstreckt sich von dort aus ca. 30 km weit nach Osten. Die grösste Breite der Mulde beträgt ungefähr 2,5 km.

Ob die Mariensteiner-Mulde als Fortsetzung der Murnauer-Mulde angesehen werden kann, konnte bisher nicht geklärt werden. Eine nach W. ZEIL (1954) horizontalflexurartige Verschiebung des Flyschs zwischen den beiden Mulden verführte vielfach zu der Annahme, dass die Ostfortsetzung der Murnauer-Mulde vom Flysch überfahren wurde. Die Mariensteiner-Mulde müsste dann einem nörd-

licheren Faltengürtel angehören.

Der westliche Teil der Mariensteiner-Mulde ist durch das Bergwerk Marienstein verhältnismässig gut aufgeschlossen. In 650 m Tiefe wird von einem Querschlag ein ca. 250 m mächtiges Schichtpaket senkrecht zur Muldenachse durchfahren. Dieses Schichtpaket enthält die Baustein-Schichten, die Untersten Cyrenen-Schichten und die Untere Bunte Molasse verzahnt mit Cyrenen-Schichten. Die Ausbildung der Schichten ist recht wechselhaft. Selten ist eine Schicht mehr als 10 m mächtig.

Da der Querschlag Süd- und Nordflügel der Mulde aufschliesst, steht in ihm jede Schicht, sofern sie nicht an der Muldensohle auskeilt, zweimal an. Es lassen sich also die Schichten des Süd- und des Nordflügels miteinander korrelieren. Um auch Betrachtungen über die Mächtigkeitsveränderungen anstellen zu können, wurden die Schichten vor ihrer Korrelierung gestreckt. Die Streckung geschah so, dass die Längen der einzelnen Schichten erhalten blieben. Das Verfahren wird in einem Anhang am Ende dieses Kapitels erläutert. Es konnte so ein mächtigkeitsgetreues Abbild des durchfahrenen Schichtpaketes konstruiert werden. Einen 400 m breiten Ausschnitt daraus stellt die Abb.8 dar.

B e s c h r e i b u n g d e r S c h i c h t e n. Es sollen zunächst die Mächtigkeitsveränderungen der Schichten betrachtet werden. Das aufgeschlossene Profil lässt sich in drei grosse Abschnitte unterteilen. Der erste beginnt im Hangenden der Untersten Cyrenen-Schichten. Seine Schichten gehen von Norden nach Süden meist vom Sandigen ins Tonige über und verlieren in gleicher Richtung an Mächtigkeit. Dieser Abschnitt umfasst ca. 60 m Sediment. In seinem Hangenden folgt eine Serie nach Norden auskeilender Schichten. Sie besteht aus sandigen Mergeln, dünnen Tonmergellagen und einigen Sandsteinbänken, von denen eine im Südschenkel als Konglomerat ausgebildet ist. In diese insgesamt ca. 80 m mächtige Schichtenfolge schieben sich nach 50 m von Norden her eine 13 m mächtige Sandsteinschicht und eine 10 m mächtige Schicht sandiger Mergel ein. Der dritte Abschnitt ent-

Abb. 8. Das Schichtenbild des vom Querschlag zum Nordflügel der 6. Sohle des Bergwerks Marienstein durchfahrenen Schichtpaketes.

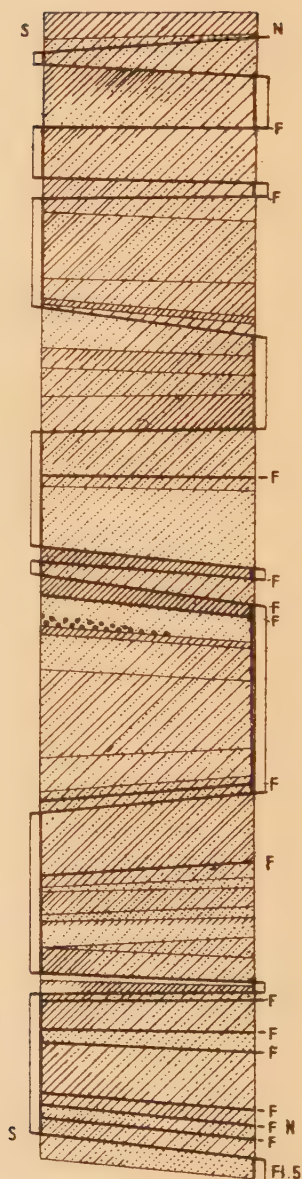


F = Flöz

Überhöhung 1:10

1cm entspr. 10m Schichtdicke

u. 100m im Streichen



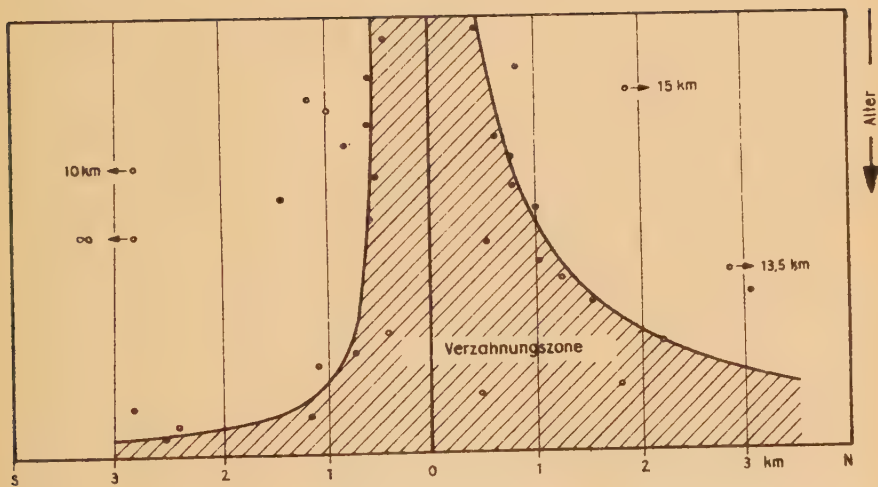


Abb. 9. Die aus den Mächtigkeitsveränderungen der Schichten abgeleitete Verzahnungstiefe der Unteren Bunten Molasse mit den Cyrenen-Schichten für ein 200 m mächtiges Schichtpaket im Hangenden der Bausteinzone von Marienstein in nord-südlicher Richtung, von der Muldenmitte aus gerechnet.

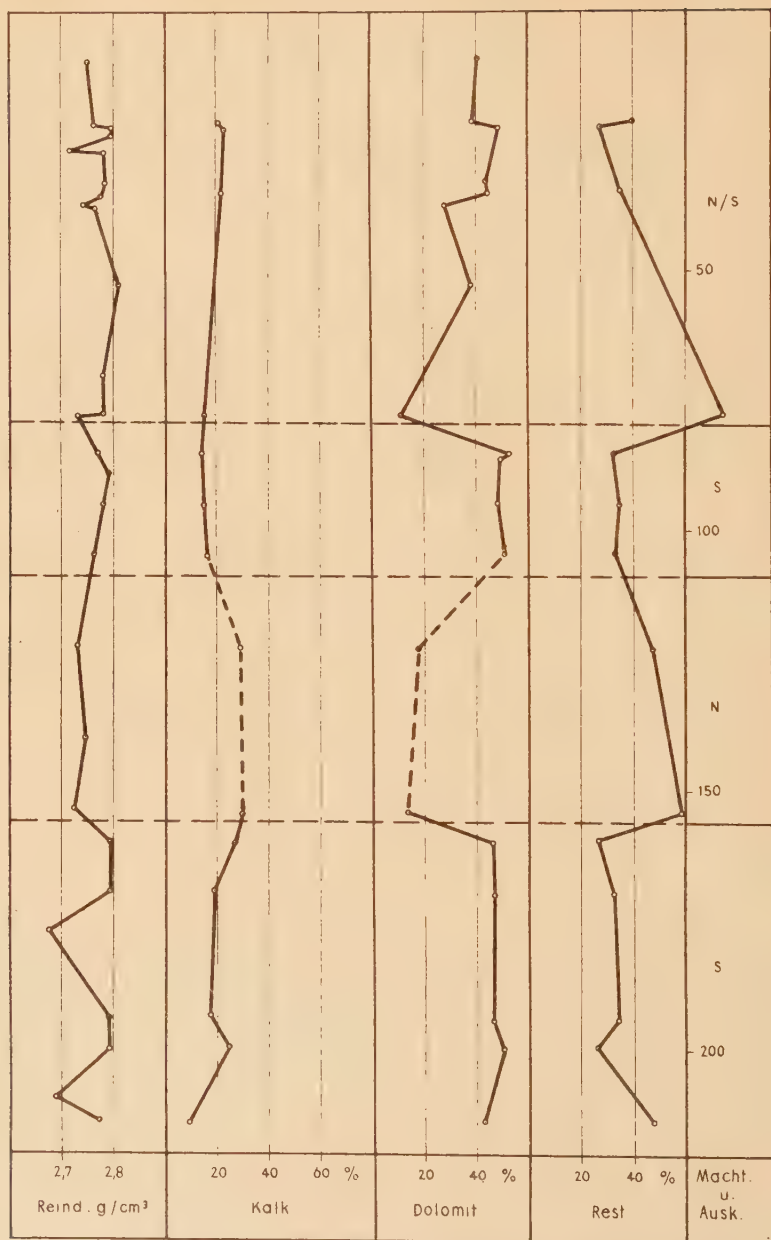


Abb. 10. Bergwerk Marienstein, physikalische und chemische Daten der vom Querschlag z. Nordfl. der 6. Sohle durchfahrenen Schichten. S = Süden; N = Norden

hält eine Zone häufigen Wechsels von nach Norden und nach Süden auskeilenden Schichten. Allgemein scheinen die nach Süden auskeilenden Schichten vom Liegenden ins Hangende an Mächtigkeit zu verlieren. Die nach Norden auskeilenden Schichten zeigen keine besondere Tendenz.

Verlängert man in dem dargestellten Profil die einzelnen Schichtlinien so weit, dass sie sich gegenseitig schneiden, so erhält man die Stellen, an denen die jeweils dazwischen liegenden Schichten auskeilen, vorausgesetzt, dass die Schichtflächen der aufgebogenen Schichten eben sind. Diese Voraussetzung ist gewagt. Den sich darauf stützenden Aussagen kann deshalb nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit beigemessen werden. Niemals können sie als einwandfreies Beweismaterial dienen.

In Abb.9 sind die Schichtfronten, d.h., die Stellen, an denen die einzelnen Schichten auskeilen, in ihrer gegenseitigen Lage zueinander als Punkte aufgezeichnet. Es ist ganz deutlich zu erkennen, wie die Verzahnungstiefe der Schichten mit fortschreitender Sedimentation abnimmt. Im Liegenden des betrachteten Schichtpaketes erfolgt diese Abnahme zunächst sehr rasch. Die Verzahnungen sind sehr tief. Bald aber ziehen sich die Fronten der einzelnen Schichten mehr und mehr in das heutige Muldeninnere zurück und verschieben sich dann nur noch wenig. Dieses Verhalten der Schichten könnte leicht zu der Annahme verführen, dass die Breite der Mulde schon während der Sedimentation irgendwie vorgegeben war. Das würde aber heissen, dass das Sedimentationsgebiet nicht eben war. Auf einem unebenen Untergrund können sich nur in beschränktem Masse ebene Schichtflächen ausbilden. Für diese Betrachtung waren aber ebene Schichtflächen vorausgesetzt worden. Wahrscheinlich ist die besondere Lage der Schichtfronten nicht die Folge irgendeiner vorhandenen Untergrundstruktur, sondern es wurden umgekehrt erst durch sie Zonen erhöhter Biegsamkeit geschaffen, die bei der auf die Sedimentation folgende Verfaltung der Schichten die Lage der Sättel bestimmten.

Es wurde nun bisher immer nur zwischen "nach Norden auskeilenden"

und "nach Süden auskeilenden" Schichten unterschieden. Es ist unschwer festzustellen, dass die nach Norden auskeilenden Schichten die Cyrenen-Schichten sind und die nach Süden auskeilenden der UBM angehören. Die Cyrenen-Schichten enthalten ungefähr 30% Kalk, das sind 10% mehr als die UBM enthält. Die Dolomitgehalte der UBM liegen bei ca. 50%. Sie sind um 25% höher als die der Cyrenen-Schichten. In der Abb.10 sind die Unterschiede der Kalk- und Dolomitführung der nach Süden und Norden auskeilenden Schichten gut zu erkennen. In der Abb.11 ist das Profil der Mariensteiner-Mulde dargestellt, wie es sich aus den hier angestellten Untersuchungen ergibt. Wir finden in den Hangenden der Baustein-Schichten zunächst eine dünne Lage von Cyrenen-Schichten. Darauf folgen 70 m UBM, die von einem 40 m mächtigen Paket von Cyrenen-Schichten abgelöst werden. Nach 30 m UBM folgt dann die eigentliche Zone inniger Verzahnung. Dieser Fazieswechsel ist, wenn man von den einzelnen Mächtigkeiten absieht, dem am Ostende der Penzberger-Mulde sehr ähnlich.

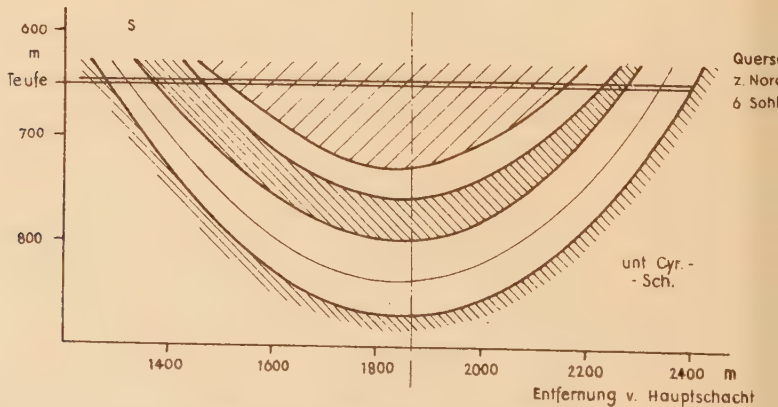


Abb.11 Profil durch die Mariensteiner-Mulde, soweit sie durch den Querschlag zum Nordflügel der 6. Sohle aufgeschlossen ist.



Cyrenen-Schichten

Untere Bunte Molasse

Verzahnung der Cyrenen-Schichten mit UBM

1 : 2 überhöht

Die Streckung und mächtigkeitsgetreue Darstellung
einfach gekrümmter Schichtpakete (schem.)

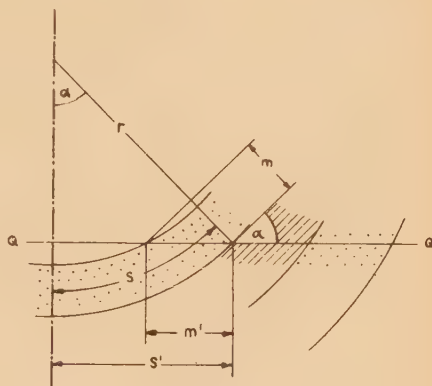
I Die Lage der gekrümmten
Schichten in der Mulde

Q = Querschlag

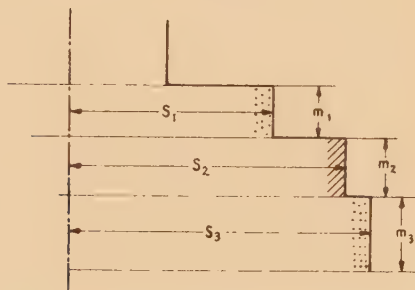
$$m = m' \sin \alpha$$

$$s = 2r\pi\alpha/360$$

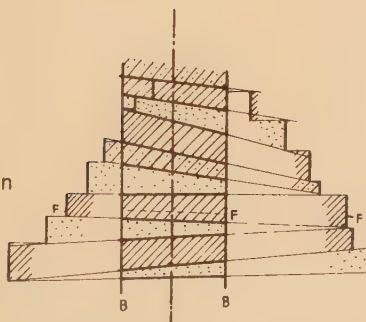
$$r = s' / \sin \alpha$$



II. Profilkonstruktion
längs des Querschlags
durch die gestreckten
Schichten



III. Die Korrelierung
der Profile
BB' entspricht dem
in Abb. 10 dargestellten
Profil



3. Tiefbohrung Tölz I

Am Nordrand der subalpinen Molasse, nur wenige Kilometer östlich der Isar, wurde in den Jahren 1947 - 49 von der Deutschen Erdöl A.-G. Wietze die Tiefbohrung Tölz I niedergebracht. Die Bohrung erreichte die Endteufe 2210 m und sollte Aufschluss bringen über die Art des Überganges von der gefalteten Molasse zur ungefalteten. Natürlich war dabei auch an eine mögliche Ölfalle an dieser Stelle gedacht. Das Öl blieb jedoch aus. Die Bohrung durchteufte der Reihe nach folgende Schichten.

Quart. Überdeckung	60 m
Oberste Cyrenen-Schichten	30 m
Promberger-Schichten, Mergel u. Sandstein	380 m
Obere Cyrenen-Schichten	370 m
UBM mit Cyr.-Schichten verzahnt	200 m
Verwerfung, ost-west-streichend mit steilem Einfallen nach Süden	
Untere Bunte Molasse	700 m
Unterste Cyrenen-Schichten	170 m
Baustein- und Tonmergel-Schichten. In den Tonmergel-Schichten wurde die Bohrung eingestellt.	

Die Schichten der gefalteten Molasse, im Hangenden der Verwerfung sind sattelförmig aufgewölbt. Der Südrand der ungefalteten Molasse ist gegen die Verwerfung hin steil aufgebogen. Der Verschiebungsbetrag zwischen gefalteter und ungefalteter Molasse dürfte nicht allzu gross gewesen sein. Die Kalk- und Dolomitführung ist an beiden Seiten der Verwerfung ungefähr gleich. Die Proben aus der Umgebung der Verwerfung enthielten ca. 30% Kalk und 8% Dolomit (Abb.12). Anders als in Murnau und Marienstein ist hier der Dolomitgehalt der UBM etwas kleiner, als der der Cyrenen-Schichten, deren Dolomitgehalt im Durchschnitt 10% beträgt. Beide Schichten enthalten ungefähr gleich viel Kalk. Hohe Dolomitanteile findet man erst wieder in den Promberger-Schichten. Sie gehören mit 60% zu den höchsten, in der Molasse gemessenen Dolomitwerten.

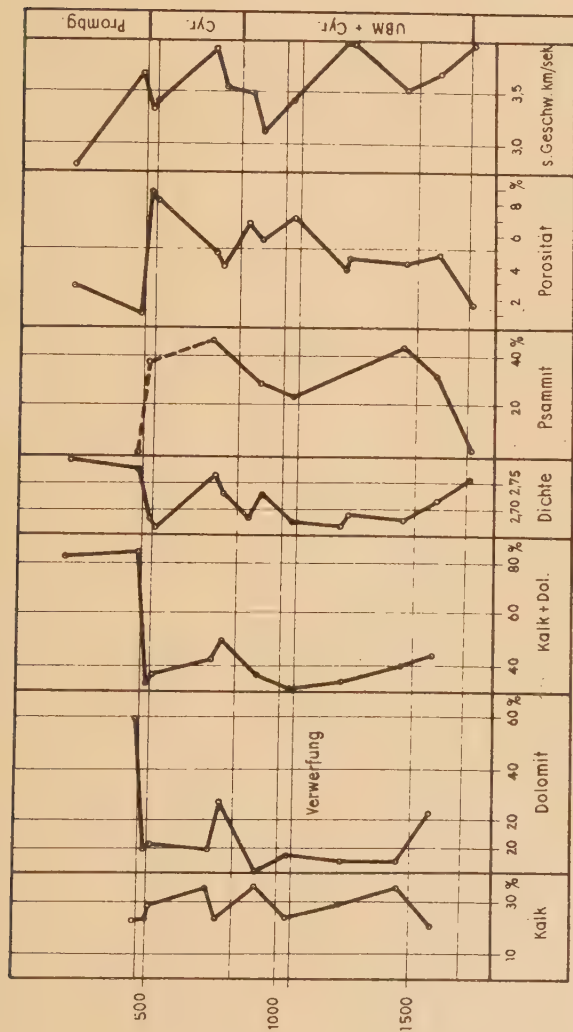


Abb. 12 Tiefbohrung Zulauf I, physikalische Eigenschaften

Die Porositäten der UBM und der Cyrenen-Schichten betragen im Durchschnitt etwa 5%. Im Hangenden der Verwerfung erhöht sich die Porosität leicht. In den Fromberger-Schichten ist sie auffallend niedrig (1% u. 3%). Trotz der marinen Fazies ist der Tongehalt der Fromberger-Schichten verhältnismässig gering. Wir befinden uns hier in einer Litoralzone, in der die tonige Fraktion nicht zur Ablagerung kommen konnte. Sie wurde ebenso wie der feinkörnige Kalk weiter ins Meer hinausgetragen. Das Zurücktreten dieser Komponenten führte zu der festgestellten Anreicherung des Dolomits.

Die seismische Geschwindigkeit nimmt mit wachsender Teufe zu. Hohe Porositäten scheinen jedoch die Geschwindigkeit etwas zu vermindern. Ein direkter Einfluss des Karbonatgehalts auf die Geschwindigkeit lässt sich hier nicht feststellen. Im Hangenden der Verwerfung, in ca. 900 m Teufe, ist sie auffallend niedrig. Vielleicht lockerten die darüber liegenden dolomit- und psammitreichen und daher starren Schichten bei der Verbiegung diese Zone auf und verminderten so deren elastische Eigenschaften. Der an dieser Stelle erhöhte Gehalt der Proben an Konstitutionswasser lässt aber auch auf einen erhöhten Tongehalt schliessen. Auch dieser würde die Geschwindigkeit vermindern.

Südöstlich von Tölz I wurde eine Reihe von Flachbohrungen niedergebracht: Kirchbichl I, IIa und IIb und Reichersbeuern II, I, V, VII, VI, IV und III (Die Aufzählung der Bohrungen entspricht ihrer Reihenfolge von Norden nach Süden). Sie endeten mit Ausnahme der beiden letzten in der USM. Die Bohrungen Reichersbeuern IV und III erreichten die Tonmergel-Schichten, die bei Reichersbeuern den Nordsattel der Mariensteiner-Mulde bilden. Aus diesen Bohrungen konnten nur wenige Proben untersucht werden. Die dort gemessenen Reindichten entsprechen ziemlich genau denen in der Tiefbohrung Tölz I.

4. Das Bergwerk Peissenberg

40 km westlich der Tiefbohrung Tölz I ist der Nordrand der gefalteten Molasse durch das Bergwerk Peissenberg aufgeschlossen.

Wir finden hier die Ausläufer der nach Westen auskeilenden Cyrenen-Schichten, deren Kohleflöze im Bergwerk abgebaut werden. Wie in Tölz I ist die Grenze zwischen gefalteter und ungefalteter Molasse durch eine steilstehende, nach Süden einfallende Störung gekennzeichnet. Beiderseits der Störung sind die Schichten steil aufgebogen. Die Verschiebungsbeträge scheinen hier wesentlich höher zu sein, als bei Tölz I. Entsprechend komplizierter ist die Tektonik. Wir finden innerhalb der Peissenberger-Mulde zahlreiche Querstörungen. Der Südschenkel, der ungefähr 3 km breiten Mulde wurde in sich noch einmal verfaultet und auf den Nordschenkel aufgeschoben. Er bildet so eine neue, selbstständige Mulde, die Ammer-Mulde. Hauptträger des Verfallungsdruckes waren hier nicht mehr, wie in der südlicheren Murnauer-Mulde, die Konglomeratbänke der UBM, sondern die Sandsteine der Promberger-Schichten. Sie bilden zusammen mit den geringmächtigen Obersten Cyrenen-Schichten und der Oberen Bunten Molasse im Hangenden und den Haupt-Cyrenen-Schichten und der UBM im Liegenden den Inhalt der Mulde.

Bis auf zwei wurden alle Proben aus den Cyrenen-Schichten entnommen. Die Proben Nr. 4 und Nr. 5 sind aus den Promberger-Schichten. Die Reindichte der Cyrenen-Schichten von Peissenberg liegt mit $2,70 \text{ g/cm}^3$ noch etwas niedriger, als die Dichte der gleichen Schichten von Tölz I. Die dunklere Farbe der Peissenberger Mergel verrät, dass für diese geringe Dichte der höhere Gehalt an organischer Substanz verantwortlich zu machen ist. Die niedrigen Dichten der Promberger-Schichten, es wurden $2,646 \text{ g/cm}^3$ und $2,638 \text{ g/cm}^3$ gemessen, sind eine Folge der hohen Quarzgehalte. Quarz hat die Dichte $D = 2,65 \text{ g/cm}^3$.

Die Kalk- und Dolomitführung der Cyrenen-Schichten ist mit 30% Kalk und 10% Dolomit genau so hoch, wie in Tölz I. Die Porositäten schwanken zwischen 2% und 7%.

5. Die Tiefbohrungen Au I bis V

30 km östlich der Tiefbohrung Tölz I stehen die Bohrungen Au I bis V. Aus ihnen wurden 12 Proben der Cyrenen-Schichten

untersucht. Sie enthielten etwa 30% Kalk und 12% Dolomit. Die Schichten sind oft sandig oder von Muschel- und Schnecken-schalen durchsetzt. Die Sandsteine enthielten ungefähr 20% Kalk, die fossilführenden Mergel etwa 40%. Die Reindichten lagen für die Sandsteine bei $2,71 \text{ g/cm}^3$ und für die Mergel rund $2,74 \text{ g/cm}^3$. Entsprechend ihrer wechsellvollen Ausbildung besaßen die Proben recht unterschiedliche Porositäten. Sie schwanken zwischen 1,5% und 14,9%, wenn man von einem kaver-nösen Stinkstein (Nr.4) absieht. Seine Porosität betrug 19,3 %.

6. Zusammenstellung der Durchschnittswerte für die einzelnen Schichten und Aufschlüsse.

		Prbg	O.Cyr.	UBM	U.Cyr.	Baustn.	Tonm.
Dichte g/cm^3	Pei	2,65	2,63	-	-	-	-
	MuI	-	2,73	2,77	2,75	-	2,71
	TöI	2,78	2,68u.2,75	2,70	2,70	2,70	-
	Ma	-	-	2,78	2,75	2,74u.2,59	2,72
	Au	-	2,73	-	-	-	-
Poros. %	Pei	18,2	5,0	-	-	-	-
	MuI	-	8,0	3,0	1u.5	-	8
	TöI	1u.3	4u.8	5,0	-	13,5	-
	Ma	-	-	3,9	5,6	10u.7	5
	Au	-	4u.10	-	-	-	-
Kalk %	Pei	-	30	-	-	-	-
	MuI	-	35	20	20	-	20
	TöI	22	25	30	-	-	-
	Ma	-	-	20	30	2	20
	Au	-	20 u.40	-	-	-	-
Dolom. %	Pei	-	12	-	-	-	-
	MuI	-	20	50	20u.45	-	16
	TöI	60	10	5	-	-	-
	Ma	-	-	50	18	14	13
	Au	-	12	-	-	-	-

Die Aufzählung der Aufschlüsse erfolgte in ihrer Reihenfolge von Westen nach Osten.

Die allgemeine Auswertung.

1. Dichte, Kalkgehalt, Dolomitgehalt und Fazies.

In Abb. 13 sind die Verteilungskurven der Reindichten, des Kalkgehaltes und des Dolomitgehaltes für die Cyrenen-Schichten, die Untere Bunte Molasse und die Tonmergel-Schichten dargestellt. Man erkennt sofort, dass zwischen den einzelnen Schichten recht wesentliche Unterschiede bestehen: Die küstenfernen marinen Ablagerungen der Tonmergel-Schichten weisen einen verhältnismässig niedrigen Kalk- und Dolomitgehalt auf (ca. 20% und 15% im Durchschnitt). Die Streuung der Werte ist ziemlich gering. Die mittlere Reindichte der Tonmergel-Schichten ist ungefähr $2,73 \text{ g/cm}^3$. Der Kalkgehalt der terrestrischen UBM entspricht ungefähr dem der Tonmergel-Schichten. Ihre Reindichte und ihr Dolomitgehalt sind jedoch beträchtlich höher, als bei den Tonmergel-Schichten. Die UBM enthält durchschnittlich 45% Dolomit mit einer Streuung von ungefähr $\pm 8\%$. Ihre Reindichte besitzt bei ca. $2,77 \text{ g/cm}^3$ einen ausgeprägten Häufungspunkt.

Die brackischen Cyrenen-Schichten enthalten im Mittel ungefähr 28% Kalk. Sie sind damit kalkreicher, als die beiden anderen Schichten. Die Reindichten der Cyrenen-Schichten besitzen, wie die der Tonmergel-Schichten bei $D = 2,73 \text{ g/cm}^3$, einen Häufungspunkt, streuen aber nach den niedrigen Reindichten hin sehr stark. Der Dolomitgehalt hat bei ungefähr 12% seinen häufigsten Wert und streut nach den höheren Gehalten sehr stark. Diese asymmetrischen Streuungen sind in der Hauptsache durch die örtlichen Unterschiede innerhalb der Cyrenen-Schichten bedingt. Die Proben aus Tölz und Peissenberg besitzen einen verhältnismässig leichten nichtkarbonatischen Anteil. Ihr Dolomitgehalt beträgt nur ungefähr 10%, während der der Cyrenen-Schichten von Marienstein bis auf 30% ansteigt. Die Dolomitgehalte der Cyrenen-Schichten von Au und Murnau liegen bei ungefähr 12%. Es scheint aber auch beim Kalkgehalt innerhalb der Cyrenen-Schichten eine Ortsabhängigkeit zu bestehen.

Die mittleren Kalkgehalte der Cyrenen-Schichten für die verschied-

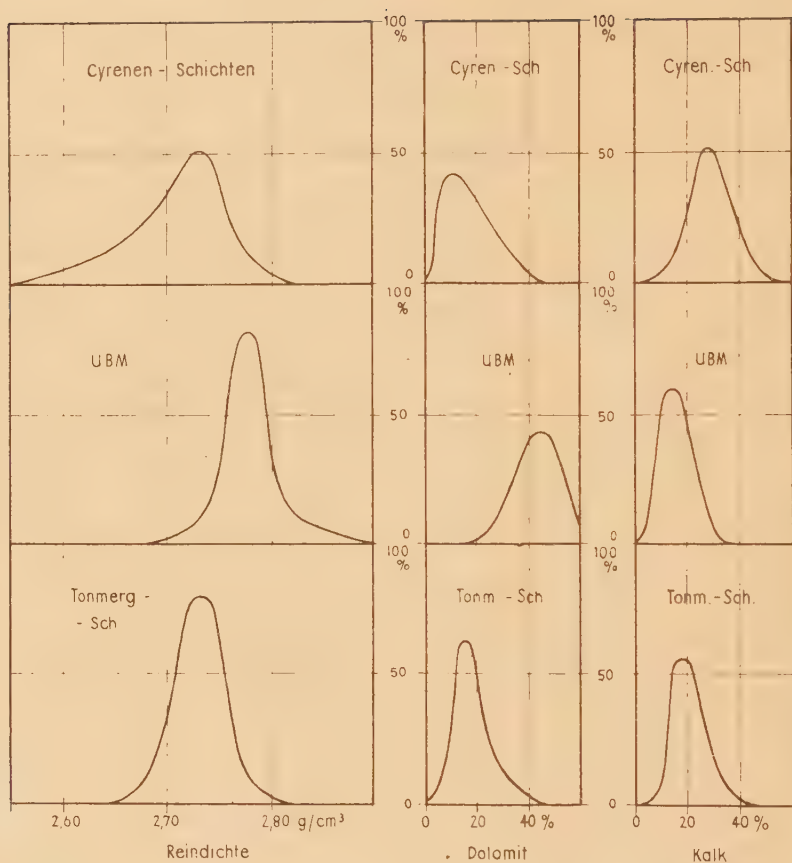


Abb. 13. Die Verteilungen der Reindichten, der Dolomit- und der Kalkgehalte für die Cyrenen-Schichten, die UBM und die Tonmergel-Schichten im Untersuchungsgebiet.

denen Entnahmeorte sind:

Au	ca. 30% Kalk
Marienstein	ca. 25% "
Tölz I	ca. 26% "
Murnau	ca. 28% "
Peissenberg	ca. 31% "

Abgesehen vom Kalkgehalt der Cyrenen-Schichten in Au entspricht diese Reihenfolge einem beständigen Anwachsen des Kalkgehaltes der Cyrenen-Schichten von Osten nach Westen.

Der Dolomitgehalt der UBM nimmt wieder bei den Cyrenen-Schichten mit Annäherung an den Alpenrand zu. Die Kalkgehalte der UBM zeigen keine besondere Tendenz.

Die Tonmergel-Schichten schliesslich, die nur in Marienstein, Reichersbeuern und Murnau erfasst werden konnten, weisen die ihrer marinen Fazies entsprechende Einheitlichkeit auf. Weder im Kalk- noch im Dolomitgehalt sind bei ihnen wesentliche örtliche Unterschiede festzustellen.

Die einzelnen Schichten lassen sich damit, wie folgt, charakterisieren:

	Reindichte	Kalk	Dolomit	
Cyrenen-Sch.	ca. 2,73g/cm ³	20-40%	b.ca.25%	(brack.)
UBM	ca. 2,77g/cm ³	10-25%	35-55%	(terr.)
Tonmerg.-Sch.	ca. 2,73g/cm ³	12-25%	10-25%	(marin)
Cyr.-Sch.	- Kalk	- nimmt nach Westen zu		
	- Dolomit	- wächst mit Annäherung an die Alpen		
	- Dichte	- wächst mit Annäherung an die Alpen		
UBM	- Kalk	- ohne Tendenz		
	- Dolomit	- wächst mit Annäherung an die Alpen		
	- Dichte	- wächst mit Annäherung an die Alpen		
Tonm.-Sch.	- Kalk, Dolomit und Dichte	- ohne Tendenz		

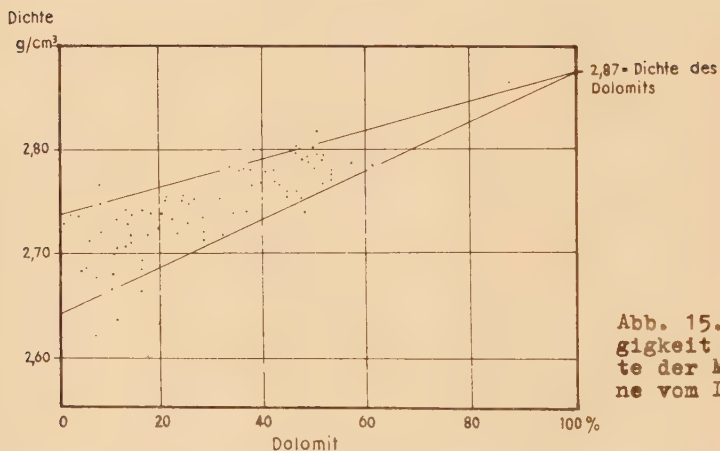


Abb. 15. Die Abhängigkeit der Reindichte der Molassegesteine vom Dolomitgehalt

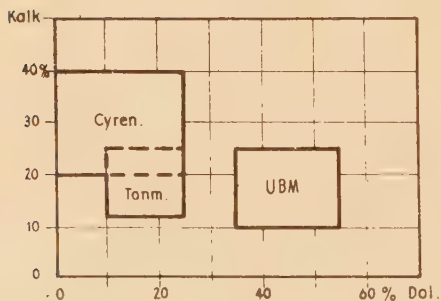


Abb. 14. Die Bereiche der UBM, der Cyrenen-Schichten und der Tonmergel-Schichten des Untersuchungsgebietes im Kalk- Dolomit-Diagramm.

In Abb. 14 sind die von den einzelnen Schichten in Kalk-Dolomit-Diagramm eingenommenen Bereiche abgegrenzt.

Die Höhe der Reindichten der Molassegesteine wird, abgesehen von vereinzelt grösseren Anteilen leichter organischer Substanzen, oder höherer Quarzgehalte, im wesentlichen durch die Höhe des Dolomitgehaltes bestimmt. Dolomit hat die Dichte $D = 2,87 \text{ g/cm}^3$. Die Dichte des Kalkes, des zweiten Hauptbestandteils der Gesteine, ist von der durchschnittlichen Dichte der noch am Aufbau beteiligten Nichtkarbonate so wenig verschieden, dass sich die Vermehrung des einen Bestandteils auf Kosten des anderen in der Gesamtreindichte nicht feststellbar auswirken kann. Reiner Kalkspat hat die Dichte $D = 2,715 \text{ g/cm}^3$. Die geringen Mengen Eisenspat ($D=3,8 \text{ g/cm}^3$), die in fast allen Proben vorkamen, beeinflussen die Reindichte der Gesteine nur sehr wenig. In Abb. 15 wurde die Reindichte der Proben in Abhängigkeit von deren Dolomitgehalt aufgetragen. Mit wachsendem Dolomitgehalt streben die Reindichten ganz deutlich der Dichte des Dolomits zu. Die Streuung der Werte wird dabei immer geringer. Dieser Umstand beweist, dass ausser dem Dolomit in den untersuchten Gesteinen keine andere wesentliche Komponente auftritt, deren Dichte stark von der des Kalkes abweicht. Die Dichten der nicht-dolomitischen Anteile, sie liegen, wie der Abbildung leicht zu entnehmen ist, zwischen ungefähr $2,65$ und $2,74 \text{ g/cm}^3$, bleiben in einem für ein Quarz-Ton-Kalk-Feldspatgemisch durchaus wahrscheinlichen Rahmen, sodass auch eine beträchtlichere Beeinflussung der am Stück gemessenen Reindichten durch verschlossene Poren sicherlich nicht erfolgt.

2. Der Wassergehalt und die pelitische Fraktion.

Bei der Bestimmung der Wassergehalte wurde zwischen Haft- und Konstitutionswasser unterschieden. Das Haftwasser, das die äussere und die freien Teile der inneren Oberfläche des Gesteins mit einer dünnen Wasserhaut überzieht, wird vom Gestein im allgemeinen schon bei seiner Erwärmung auf 110°C abgegeben. Zur Austreibung des Konstitutionswassers bedarf es meist höherer Tempe-

raturen. Es ist in die Gitter bestimmter Mineralien mit eingebaut.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, bilden die Tonminerale die stärkste Gruppe der in den Molassegesteinen auftretenden wasserhaltigen Mineralien. Es ist demnach sehr wahrscheinlich, dass die Höhen der Konstitutionswassergehalte durch die Tongehalte bestimmt werden. Die Tonminerale gehören aber auch zu den feinstkörnigen Mineralarten und besitzen aufgrund ihres schwammartigen Gefüges eine im Verhältnis zu ihrem Volumen sehr grosse Oberfläche. Proben mit hohen Tongehalten lassen auch grosse Haftwassergehalte erwarten, da die Menge des an der Probe haftenden Wassers proportional ist der Grösse der dem Wasser zur Verfügung stehenden Oberfläche.

Von fast allen hier untersuchten Proben wurde die Korngrössenfraktion 66 der nichtkarbonatischen Anteile gewichtsmässig bestimmt. Das entspricht ungefähr einer Trennung in eine pelitische und eine psammitische Komponente.

Zeichnet man die Grössen der Haftwasser- und Konstitutionswassergehalte in Abhängigkeit von den pelitischen Fraktionen auf, so stellt man ein sehr deutliches Anwachsen der Wassergehalte mit den Pelitanteilen fest (Abb.16 u. Abb.17). Die dabei auftretenden starken Streuungen sind sicher auf die unterschiedlichen Zusammensetzungen der pelitischen Komponenten zurückzuführen.

Neben den Tonmineralien enthalten die Pelite noch fein zerriebene Quarze und Feldspäte in wechselnden Mengen und es ist eigentlich erstaunlich, dass die erwähnten Abhängigkeiten trotzdem noch so gut zu erkennen sind. Im Durchschnitt enthalten die Pelite, wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, ungefähr 2,5% Haftwasser und 5% Konstitutionswasser. Wird angenommen, dass die Tonminerale ungefähr 10% Konstitutionswasser besitzen, das entspräche den Wassergehalten der Montmorillonite, so kann man vermuten, dass die Tonminerale ungefähr die Hälfte der Pelite ausmachen.

Örtlich bedingte Unterschiede zwischen den Konstitutionswassergehalten konnten nicht festgestellt werden. Ein Einfluss der Fazies scheint zu bestehen. Die Proben der Tonmergel-Schichten

enthielten im Durchschnitt ungefähr 3,3% Konstitutionswasser. Die Konstitutionswassergehalte der UBM lagen zwischen 1,0% und 2,5%. Bei den Cyrenen-Schichten lassen sich zwei Gruppen unterscheiden. Die erste Gruppe mit ungefähr 1% Konstitutionswasser enthält die grobkörnigen Proben, die feinkörnigen Proben enthalten zwischen 3% und 4% Konstitutionswasser.

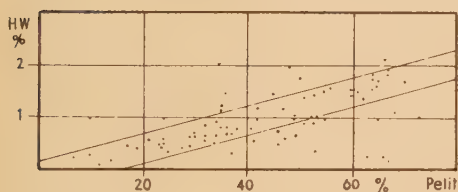


Abb.16 Der Haftwasser-
gehalt in Abhängigkeit
von der nichtkarbona-
tischen, pelitischen
Fraktion

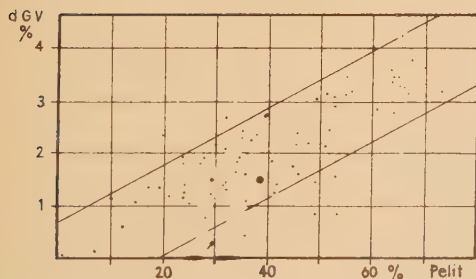


Abb.17 Der Konstitu-
tionswassergehalt in
Abhängigkeit von der
nichtkarbonatischen,
pelitischen Fraktion

3. Die Porosität, der Ton- und Sandgehalt.

Die Porosität ist wohl die eigenwilligste Grösse, die an einem Sedimentgestein bestimmt werden kann. Sie unterliegt den verschiedensten Einflüssen sehr stark. Sie kann sich innerhalb eines recht einförmig erscheinenden Gesteins ohne ersichtlichen Grund plötzlich um das Doppelte oder Dreifache vergrössern. An anderer Stelle verschwindet sie auf die gleiche Weise fast vollständig, um dann wieder innerhalb verschiedener Schichten eine unerwartete Einförmigkeit aufzuweisen.

Ihrer Entstehung nach lassen sich zwei Arten der Porosität unterscheiden. Die *i n t e r g r a n u l a r e* Porosität, die durch die Form und Grössenverteilung der das Gestein aufbauenden Körner und die Menge der vorhandenen Untergranularmasse, also dem Zementierungsgrad bestimmt wird. Die zweite Art ist bedingt durch das schwammartige Gefüge der Tonmineralien. Sie sei deshalb *T o n - Porosität* genannt. Ihr Anteil an der Gesamtporosität hängt von der im Gestein enthaltenen Tonmenge ab. Jedem Gestein wird deshalb eine seinem Tongehalt entsprechende Mindestporosität zuzuordnen sein.

Wählt man die Menge des in einem Gestein enthaltenen Haftwassers als Masszahl für seinen Tongehalt, so lässt sich aus dem in Abb.18 dargestellten Diagramm ein Zusammenhang zwischen Porosität und Tongehalt herauslesen. Mit zunehmendem Haftwasser steigt die Porosität bis auf 8% an. Der Haftwassergehalt beträgt dort 2,3% und hat damit seinen höchsten, bei den untersuchten Proben vorkommenden Wert erreicht. Mit weiter zunehmender Porosität nimmt der Haftwassergehalt rasch ab. Das heisst, die Ton-Poren werden mehr und mehr durch intergranulare Poren ersetzt. Die nichttonige Komponente nimmt zu. Je mehr intergranulare Poren ein Gestein besitzt, desto geringer muss für dieses Gestein das Verhältnis Haftwasser : Porosität sein. Abb.19 zeigt die Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Haftwasser und Porosität vom Psammitgehalt. Wenn auch die Anzahl der in dieses Diagramm eingetragenen Werte nicht ausreicht, um quantitative Angaben über diesen Zusammenhang machen zu können, so ist

sein Bestehen doch unverkennbar.

Damit wäre zunächst gezeigt, wie die Porosität eines Gesteins eng mit dessen lithologischer Beschaffenheit verknüpft ist. Bei der Untersuchung dieser Zusammenhänge wurde die Abhängigkeit der Porosität von dem auf das Gestein lastenden Hangend-
druck ganz ausser acht gelassen. Es taucht nun die Frage auf, ob eine bedeutendere Tiefenabhängigkeit der Porosität innerhalb der den Geologen zugänglichen Tiefenbereiche überhaupt besteht, und ob es möglich und sinnvoll ist, eine solche zu ermitteln.

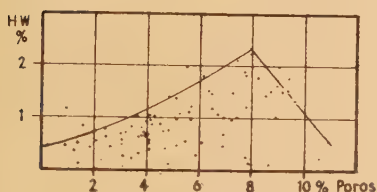


Abb.18 Der Zusammenhang zwischen Haftwassergehalt und Porosität eines Gesteins.

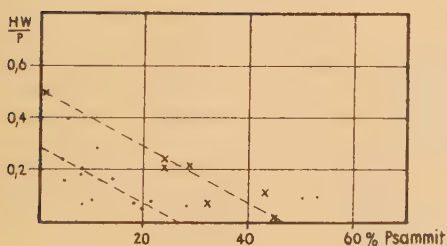


Abb.19 Das Verhältnis Haftwassergehalt zur Porosität in Abhängigkeit vom Psammitgehalt.

x = Tölz I
• = Murnau I u. Marienstein

4. Porosität und Druck.

Die Druckabhängigkeit der Porosität kann nicht aus einer gesetzmässigen Verminderung der Porosität mit wachsender Teufe herausgelesen werden, solange es nicht gelingt, die Einflüsse

der Gesteinsbeschaffenheiten formelmässig zu erfassen. Dazu reicht das zur Verfügung stehende Beobachtungsmaterial nicht aus. Sowohl einer experimentellen Bestimmung im Labor, als auch einer theoretischen Ableitung des Tiefengradienten der Porosität für geologische Schichten stellen sich Schwierigkeiten entgegen, die heute, und wahrscheinlich auch in absehbarer Zeit nicht überbrückt werden können. Alle Druckversuche im Laboratorium sind notwendigerweise auf im Vergleich zu geologischen Zeiträumen sehr kurze Zeiten beschränkt. Der Mechanismus des Zusammendrückens eines festen Körpers und besonders sein diesbezügliches Langzeitverhalten ist so kompliziert, dass er noch nicht einmal für besser definierte Stoffe, als sie die Gesteine darstellen, restlos geklärt ist. In einen diesen Vorgang beschreibende Formel müsste neben der Druckgrösse und Druckzeit auch der Druck der Porenflüssigkeit, das Gefüge und die Umwandelbarkeit der das Gestein aufbauenden Mineralkörner durch Lösungsvorgänge, Gitterveränderungen und Umkristallisationen eingehen. Für eine empirische Ermittlung des Tiefengradienten sind Proben aus der gefalteten Molasse denkbar ungeeignet. Die gefaltete Molasse ist tektonisch stark beansprucht. Es ist sehr wahrscheinlich, dass bei der Verfaltung auch die Porosität in Mitleidenchaft gezogen wurde und die Schichten nicht mehr die Porositäten aufweisen, die ihnen im Falle einer Beanspruchung durch den Hangenddruck allein zukämen. Zudem ist die Ausbildung der Schichten sehr wechselhaft. Zwei Proben aus verschiedenen Tiefen können in der Molasse nur selten miteinander verglichen werden.

5. Porosität und seismische Geschwindigkeit.

Es ist seit langem bekannt, dass die seismische Geschwindigkeit in der Molasse mit der Annäherung an den Alpenrand wächst (H. REICH 1942 u. 1945). wahrscheinlich ist diese Zunahme nicht nur die Folge des zum Alpenrand hin wachsenden Karbonatgehaltes, sondern auch durch die in gleicher Richtung abnehmende Porosität bedingt.

WILLIE, GREGORY u. GARDENER (1956) haben gezeigt, dass die Porosität eines Gesteins dessen elastische Eigenschaften stark

beeinflusst. Sie untersuchten Kalksteine und Quarzsandsteine verschiedener Porositäten im Laboratorium und gelangten zu den in der Abb. 20 dargestellten Kurven für die Abhängigkeit der seismischen Geschwindigkeit von der Porosität.

Die in Tölz I und Murnau I durch Bohrlochmessungen ermittelten Geschwindigkeiten lassen sich in diese Darstellung gut einfügen. Die tonigen Proben der Tonmergel-Schichten von Murnau liegen mit ihren seismischen Geschwindigkeiten etwas unter der Sandsteinkurve. Erst im obersten Teil der Tonmergel-Schichten finden wir eine höhere Geschwindigkeit. Sie ist sicher eine Folge des auf Kosten des Tones zunehmenden Karbonatgehaltes. Die zum Teil stark sandigen Proben aus Tölz I folgen verhältnismässig gut der Sandsteinkurve. Wegen ihres Tongehaltes liegen sie vereinzelt etwas niedriger. Die Proben aus den Cyrenen-Schichten und der UBM von Murnau nehmen im Diagramm den aufgrund ihrer Zusammensetzung ihnen zukommenden Platz ein. Ihre Geschwindigkeiten liegen zum grössten Teil zwischen der des reinen Kalkes und der der Sandsteine. Das heisst aber nicht, dass Proben mit höheren Geschwindigkeiten kalkreicher sein müssen als die anderen. Auch ein hoher Dolomitgehalt erhöht die Geschwindigkeit. In der folgenden Tabelle sind die seismischen Geschwindigkeiten und die Karbonatgehalte von acht Proben aus Murnau I, deren Porositäten ungefähr gleich hoch sind (zwischen 0,9% und 2,3%), gegenübergestellt.

Pr.Nr.	Karb. %	v km/sek	Poros. %	K/D
Mu. 37	46	4,6	1,2	0,85
Mu. 28	53	4,9	2,3	0,24
Mu. 27	57	4,9	0,9	0,19
Mu. 26	60	5,4	1,3	0,27
Mu. 30	61	5,4	1,9	0,29
Mu. 35	64	5,3	1,5	0,42
Mu. 34	69	4,8	1,3	0,38
Mu. 25	71	5,7	1,7	0,26

K/D = Kalkgeh./Dolomitgeh.

Karbonatgehalt und seismische Geschwindigkeit in der Tiefbohrung Murnau I.

Das Anwachsen der seismischen Geschwindigkeit mit dem Karbonat-

gehalt ist unverkennbar. Lediglich die Probe Nr. 34 fällt stark aus der Reihe heraus. Ihre Geschwindigkeit ist im Vergleich zum Karbonatgehalt zu niedrig. Die Probe unterscheidet sich von den anderen durch ihre hohe Reindichte ($2,814 \text{ g/cm}^3$), die durch eingelagerte Pyritknollen ($D=6,3 \text{ g/cm}^3$) bedingt ist.

Ein Einfluss des Kalk-Dolomitverhältnisses auf die Geschwindigkeit ist innerhalb des hier betrachteten Bereiches nicht zu erkennen. Auch von einer Tiefenabhängigkeit der Geschwindigkeit ist nichts zu bemerken. Wahrscheinlich ergibt sich letzteres erst aus der elastischen Zusammendrückung des Gesteins in seinem natürlichen Verband. Bei Geschwindigkeitsmessungen längs der Bohrlochwand misst man in einem Gebiet, in dem diese Zusammendrückung durch die einseitige Druckentlastung beim Aufbohren nicht mehr im vollen Umfang vorhanden ist. Anders verhält es sich bei Geschwindigkeitsmessungen, bei denen lediglich die Wellenempfänger (Geophone) im Bohrloch untergebracht sind, der Sender (Schusspunkt) aber ausserhalb des Bohrloches liegt. Die Wellen laufen dann auch durch das von der Bohrung nicht mehr beeinflusste Gebiet. Dass hier tatsächlich ein Unterschied besteht, lässt sich aus einem Vergleich der Geschwindigkeitskurven von Murnau I und Tölz I schliessen. Während die nach der velocity-log-Methode, bei der sich Sender und Empfänger im Bohrloch befinden, gemessenen Geschwindigkeiten von Murnau keine Zunahme mit der Tiefe zeigen, wachsen die Geschwindigkeiten im Bohrloch Tölz I mit der Tiefe. Sie wurden durch einen Oberflächenschuss und im Bohrloch aufgehängte Geophone gemessen.

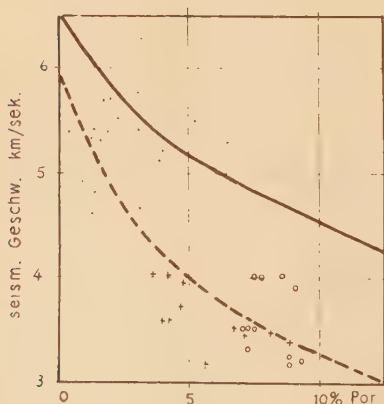


Abb.20 Die Abhängigkeit der seismischen Geschwindigkeit von der Porosität für Kalkstein und Quarzsandstein nach WILLIE, GREGORY u. GARDENER und Molassegesteine.

Murnau I UBM + Cyr.
Murnau I Tonm.-Sch.
+ Tölz I UBM + Cyr.

ausgezogene Linie Kalkstein
gestrichelt Quarzsandstein

6. Die nichtkarbonatischen Anteile.

Im Abschnitt 3 dieses Kapitels wurde für diese Anteile bereits festgestellt:

- 1.) Die Haft- und Konstitutionswassergehalte nehmen mit wachsender pelitischer Fraktion zu, 100 Gewichtsteile der pelitischen Fraktion enthalten ungefähr 2,5 Gewichtsteile Haftwasser und 5 Gewichtsteile Konstitutionswasser.
- 2.) Die Proben aus den Tonmergel-Schichten enthielten im Durchschnitt etwa 3,3% Konstitutionswasser, die aus der UBM 1% - 2,5% und die aus den Cyrenen-Schichten 3% - 4%. Die grobkörnigen Proben aus den Cyrenen-Schichten hatten nur etwa 1% Konstitutionswasser.
- 3.) Ortliche Unterschiede in den Wassergehalten konnten nicht festgestellt werden.
- 4.) Nimmt man an, dass die in den Mergeln enthaltenen Tonmineralien 10% Konstitutionswasser besitzen (Montmorillonit), so ergibt sich aus 1, dass die pelitischen Fraktionen ungefähr zur Hälfte aus Tonmineralien bestehen.

Anhand der Proben aus der Tiefbohrung Murnau I soll nun gezeigt werden, dass die in Punkt 4 angegebene Zusammensetzung der pelitischen Fraktion nicht für alle Schichten der Molasse gleich ist, sondern faziesbedingte Unterschiede aufweist.

Für die Tonmergel-Schichten, die Cyrenen-Schichten und die UBM wurden die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Konstitutionswassergehalte der Pelite errechnet. Sie liegen mit wenigen Ausnahmen bei den Tonmergel-Schichten zwischen 5% und 6% und bei der UBM zwischen 4% und 5%. Die Pelite der Cyrenen-Schichten weisen in ihren Konstitutionswassergehalten eine sehr breite Streuung auf (zwischen 1% und 7%). Ein Häufungspunkt ist nicht zu erkennen. Die Ursache dafür ist sicher nicht nur bei der stark wechselnden Ausbildung dieser Schichten zu suchen. Höhere Gehalte an organischer Substanz, die hier zuweilen auftreten, dürften die Konstitutionswassergehalte verändern.

	Tonm.-Sch.	Cyr.-Sch.	UBM
1.	3,35 %	1,20 %	2,70 %
2.	3,45	1,50	3,20
3.	4,60	2,05	3,25
4.	5,05	2,20	4,00
5.	5,10	2,80	4,15
6.	5,25	3,20	4,30
7.	5,25	3,80	4,60
8.	5,45	4,00	4,60
9.	5,60	4,70	4,90
10.	5,80	4,85	4,90
11.	5,85	5,40	
12.	6,05	5,50	
13.		5,70	
14.		6,15	
15.		6,30	
16.		6,60	

Die Konstitutionswassergehalte bezogen auf die pelitische Fraktion der Nichtkarbonate für die die Schichten der Tiefbohrung Mur-nau I.

Rechnet man wieder mit einem Wassergehalt der Tonmineralien von 10%, so kann der Gehalt der Pelite an Tonmineralien für die Tonmergel-Schichten mit 50% - 60%, für die UBM mit 40% - 50% angenommen werden. Die Tonmergel-Schichten enthalten im Durchschnitt 61,3%, die Schichten der UBM 34,7% pelitische Nichtkarbonate. Die Anteile der Tonmineralien am Gesamtgestein wären dann für die Tonmergel-Schichten 31%-37% und für die UBM 14% - 17%. Höhere Gehalte der Nichtkarbonate an psammitischem Material traten bei den untersuchten Proben nur vereinzelt auf. Die oben angegebenen Tongehalte der pelitischen Nichtkarbonate können daher auch als die Tongehalte der Nichtkarbonate selbst angesehen werden.

Wenn die Nichtkarbonate der verschiedenen Schichten verschieden hohe Tongehalte aufweisen, so ist zu erwarten, dass sich auch ihre Dichten unterscheiden.

Die Dichten der Nichtkarbonate konnten nach der Formel

$$n = \frac{s \cdot d \cdot k \cdot N}{100 \cdot d \cdot k - s(D \cdot k + K \cdot d)}$$

n = Dichte der Nichtkarbonate
d = 2,87g/cm³ = Dolomitdichte
k = 2,72g/cm³ = Kalkdichte

N = %-Gehalt der Nichtkarbonate
D = Dolomitgehalt
K = Kalkgehalt
s = Reindichte des Gesteins

berechnet werden.

Bei der Ableitung dieser Formel geht man von der Vorstellung aus, dass sich das Volumen des Gesteins zusammensetzt aus dem vom Kalk eingenommenen Volumen, dem vom Dolomit eingenommenen Volumen und dem Volumen der Nichtkarbonate. Da das Volumen eines Körpers gleich Gewicht durch Dichte ist, gelangt man für 100 g Gestein zu der Gleichung

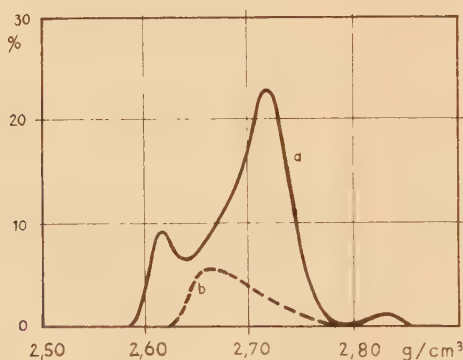
$$\frac{N}{n} + \frac{K}{k} + \frac{D}{d} = \frac{100}{s}$$

Hieraus ist n zu eliminieren.

In der Abb. 21 sind die Verteilungskurven der so errechneten Dichten der Nichtkarbonate für die Tonmergel-Schichten (UMM) und die Untere Süsswasser-Molasse, das sind die Cyrenen-Schichten und die UBM, dargestellt.

Die häufigste Dichte der Nichtkarbonate aus den Süsswasser-Schichten liegt bei $2,71\text{g/cm}^3$. Ein zweiter Häufungspunkt zeichnet sich bei $2,62\text{g/cm}^3$ ab. Er ist weniger bedeutend, als der erste und umfasst nur etwa 10% aller Werte, gegenüber 25% im ersten Häufungspunkt. Neben den Tonmineralien enthalten die Nichtkarbonate zum grössten Teil Quarze. Glimmer und Chlorite kommen nur vereinzelt in grösseren Mengen vor. Feldspäte treten, ausser in den Baustein-Schichten und in der UBM von Tölz nur in verhältnismässig geringen Mengen auf. Es ist jedoch anzunehmen, dass sie in den feinerkörnigen Fraktionen häufiger werden, als sie in den groben Fraktionen sind. Quarz hat die Dichte $2,65\text{g/cm}^3$. Die Dichte der Feldspäte schwankt zwischen $2,56\text{g/cm}^3$ (Orthoklas) und $2,76\text{g/cm}^3$ (Anorthit). Auch wenn wir annehmen, dass sich die gröbere Fraktion der Nichtkarbonate aus Quarz und vorwiegend Plagioklas zusammensetzt, so erscheint die Dichte $2,71\text{g/cm}^3$ für dieses Gemisch etwas hoch. Sicher macht sich hier der Einfluss einiger schwerer Mineralien bemerkbar, die zwar nur in geringen Mengen auftreten, aber durch ihre hohe Dichte die Gesamtdichte wesentlich erhöhen können. Es sind dies Muskovit (2,85), Biotit (3,01) und die Erze und Schwermineralien. Das gleiche dürfte auch für die Dichten der Nichtkarbonate der Tonmergel-Schichten gelten. Der häufigste Wert für diese Dichte ist $2,66\text{g/cm}^3$. Er liegt damit um $0,05\text{g/cm}^3$ niedriger, als der der Nichtkarbonate aus den Süss-

wasserschichten. Die Dichten streuen jedoch besonders nach den hohen Werten so stark, dass die Dichte der Nichtkarbonate als Unterscheidungsmerkmal für die Schichten als ungeeignet erscheint.



Die Verteilung der Dichten der Nichtkarbonate für die USM (a) und die Tonmergel-Schichten (b)

7. Die Schwerminerale

Von zwei Proben aus den Cyrenen-Schichten von Tölz und Murnau wurden die Schwerminerale der Korngrößenfraktion 0,066 mm - 0,10 mm ausgezählt. Es ergaben sich die folgenden Werte:

	<u>Murnau</u>	<u>Tölz</u>
Granat	49%	72%
Turmalin	16%	13%
Zirkon	9%	2%
Rutil	12%	2%
Apatit	2%	1%
Epidot	4%	1%
Staurolit	7%	8%
Glaukophan	-	1%
Opak auf 100 durchsichtige	145	95

Bis auf den hohen Rutilgehalt der Probe aus Murnau ist den Analysen nichts wesentlich Neues zu entnehmen, zumal die Variationsbreiten der Schwermineralien nicht bekannt sind. Die Probe aus Tölz besitzt den Granat-Turmalin-Typus mit etwas Staurolith, wie ihn schon H. FÜCHTBAUER (1953) für dieses Gebiet beschrieb. Die Probe aus Murnau wäre nach Füchtbauers Bezeichnungsweise durch die Buchstaben GTRszea zu charakterisieren (G=Granat; T=Turmalin; R=Rutil; s=Staurolith; z=Zirkon; e=Epidot; a=Apatit; Grossbuchstaben=Hauptgemengteile - 10%, Kleinbuchstaben=Nebengemengteile 2% - 10% der Schwermineralien). FÜCHTBAUER gibt für das Gebiet zwischen Isar und Lech die Schwermineralzusammensetzung mit GSTzra an. Ich glaube nicht, dass die Untersuchung einer grösseren Anzahl von Proben wesentliche Abweichungen von den Werten Füchtbauers gebracht hätte. Der hohe Rutilgehalt der Probe aus Murnau dürfte kaum irgend welche Schlüsse zulassen. Die langgestreckten Kristalle können leicht zerbrechen und so ihre Stückzahl verdoppeln oder verdreifachen, ohne dass sich der tatsächliche Rutilgehalt änderte. Ein Schwermineralpräparat aus den Cyrenen-Schichten von Au liess sich nicht auswerten. Es waren ganz überwiegend opake Körner mit etwas Granat und wenig Turmalin und Zirkon.

Geologische, paläogeographische und geotektonische Folgerungen.

Die S e d i m e n t a t i o n. Im Gebiet der subalpinen Molasse zwischen Murnau und Marienstein weisen die Tonmergel-Schichten die für ein küstenfernes Sediment charakteristische Einförmigkeit auf. Eine litorale Fazies, wie sie bei den Promberger-Schichten von Tölz und Reissenberg erkennbar ist, lässt sich in Marienstein überhaupt nicht finden und ist in Murnau nur in den obersten Teilen der Tonmergel-Schichten leicht angedeutet. Zweifellos muss eine Litoralzone am Südrand der Molasse irgendwo vorhanden gewesen sein, und wir müssen annehmen, dass die frühe Oligozän-Molasse ursprünglich weiter nach Süden reichte, als dies heute der Fall ist. Ob der im Süden fehlende Teil der Molasse wieder abgetragen wurde, oder ob ihn der Flysch bei seinem Vordringen nach Norden überfuhr, kann hier nicht entschieden werden.

In der Unteren Süßwasser-Molasse sind die Mergelproben aus Murnau und aus Marienstein auffallend ähnlich. Konglomerate, wie sie in Murnau sehr häufig auftreten, findet man in Marienstein jedoch kaum noch. Das einzige, im Querschlag 2 West von Marienstein anstehende Konglomerat ist im Vergleich zu denen von Murnau schon recht feinkörnig. Es enthält nur wenig Gesteinskörner über 5 mm Durchmesser. 69% der ausgewählten Körner waren Dolomite, davon ungefähr ein Fünftel schwarze Dolomite. Die Körner sind meist stark poliert und oft von einer dunklen Pigmenthülle umgeben. Größere Kalkgerölle sind kaum vorhanden. Das Konglomerat keilt nach Norden aus. Es liegt hier ein typisches Flachseesediment vor, bei dem die Gerölle durch die bis auf den Grund reichende Wellenbewegung dauernd aneinander gerieben und poliert wurden. Seiner Zusammensetzung nach entstammt dieses Konglomerat dem sich im Westen ausbreitenden Nesselburgfächer und wanderte längs der Küste langsam ostwärts. Trotzdem die Materialzufuhr für die Schichten von Marienstein offensichtlich aus dem Westen erfolgte, finden wir hier eine west-ost streichende Verzahnung der brackischen Cyrenen-Schichten mit der Unteren Bunten Molasse. Die Cyrenen-Schichten keilen nach Norden aus. Von ihnen dürfte sich nur der unterste Teil über die Mariensteiner-Mulde hinaus nach Norden

erstrecken. Wahrscheinlich wurden schon im frühen Chatt die Cyrenen-Schichten von Marienstein von denen bei Tölz durch eine west-ost streichende Zunge fluviatiler Sedimente, also einer Art Flussdelta, getrennt. Der dieses Delta bildende Fluss kam aus dem Nesselburgfächer. Die Transportkraft des Flusses war nicht mehr allzu beträchtlich, sodass diese Zunge nie besonders hoch werden konnte. Sie wurde deshalb oft überschwemmt, wodurch die innige Verzahnung zwischen der UBM (Deltaschüttung) und den Cyrenen-Schichten (Brackwasserabsatz) zustande kam. Diese Transgressionen konnten im tieferen Chatt, als der Nesselburgfächer noch nicht allzu gross war, bis ungefähr an den heutigen Lauf des Lechs vordringen. Die als untere Cyrenen-Schichten bezeichneten Schichten von Murnau sind wahrscheinlich schon eine Verzahnung mit der UBM (teilweise sehr hohe Dolomitgehalte!). Mit der wachsenden Grösse des Nesselburgfächers wurde das Ufer des Molasse-Meeres immer weiter nach Osten verdrängt. Im späteren Chatt erreichten die Transgressionen kaum noch die Gegend von Penzberg. Wahrscheinlich durch die einsetzende Zusammenschiebung des Südrandes der Molasse hervorgerufen, erfolgte dann eine grosse Transgression, die das ganze Gebiet bis zum Lech wieder erfasste. Der durch die Zusammenschiebung bereits etwas angehobene Südrand der Molasse war von dieser Überschwemmung nicht mehr betroffen. Westlich des Nesselburgfächers, zwischen Bregenzer Ach und Iller, breitete sich der Hochgratfächer aus (S. SCHIEMENZ 1953). Nach seinem Eintreten in das Molassebecken wandte sich das ihn aufbauende Flusssystem nach Osten. Es folgte damit dem Gefälle des Alpenvorlandes. Durch den Gerölleschutt des Nesselburgfächers wurde es nach Norden abgedrängt und floss dann längs des Nordrandes des Nesselburgfächers ostwärts weiter. Sicher hatte es sich hier schon zu einem einzigen Fluss vereinigt. An dessen Mündung in das chattische Molassemeer, ungefähr in der Gegend östlich von Peissenberg, entstand aus dem bereits stark aufgearbeiteten Schutt ein Flussdelta. Es wurde, ebenso wie das sich südlich davon ausbreitende Delta des Flusses aus dem Nesselburgfächer, öfters überschwemmt, wodurch auch hier der häufige Wechsel zwischen der UBM und den Cyrenen-Schichten zustande kam. Die Spuren dieses Deltas sind heute in den quarzreichen Schich-

ten der UBM von Tölz zu erkennen. Ihr Schwermineralgehalt stimmt mit dem des Hochgratfächers gut überein. H. FUCHTBAUER (1953) gibt für das Gebiet westlich der Iller die Associationen GTSa und östlich der Iller Gzrs an. Die UBM von Tölz enthält die Schwermineralvergesellschaftung GTSzr. Apatit ist zu etwa 1% vorhanden. Man kann sich gut vorstellen, dass die UBM von Tölz eine Mischung des Schuttes aus diesen beiden Gebieten ist.

Für die Herkunft der UBM von Tölz aus dem Hochgratfächer spricht auch ihr niedriger Dolomitgehalt. Sie enthält im Durchschnitt nur etwa 5% Dolomit. Bei Murnau und Marienstein, die beide im Einflussgebiet der dolomitreichen Schüttung des Nesselburgfächers liegen, betragen die Dolomitgehalte der UBM etwa 50%.

Die Erklärung der Zunahme des Kalkgehaltes nach Westen bei den Cyrenen-Schichten ist einfach, wenn man bedenkt, dass es sich hier, im Bereich der subalpinen Molasse, um fast reine Detrituskalke handelt. Es sind die Reste der aus den Schuttfächern und Flussdeltas herausgelösten (im mechanischen Sinne) und zerriebenen Kalkgerölle. Sie wurden bald wieder abgesetzt, während die leichteren Quarze weiter ins Meer hinaus getragen werden konnten (hohe Quarzgehalte bei Au). Die von W. ELBERSKIRCH (1953) festgestellte Zunahme der seismischen Geschwindigkeit in der Molasse von Osten nach Westen dürfte eine Folge dieser Sortierung sein.

Die Zunahme der seismischen Geschwindigkeit mit der Annäherung an die Alpen (H. REICH, 1942 u. 1945) ist wohl eher auf die in gleicher Richtung wachsenden Karbonatgehalte, als auf eine stärkere Pressung der Schichten zurückzuführen. Die in gleicher Richtung abnehmende Porosität hat wahrscheinlich nur wenig mit der Wirkung des Faltungsdruckes zu tun. Sie ergibt sich schon aus dem Zurücktreten der die Poren enthaltenden nichtkarbonatischen Komponente zugunsten der Karbonate.

Die F a l t u n g d e r s u b a l p i n e n M o l a s s e.
Durch die beiden obenbeschriebenen Zungen wurden in der Molasse ost-weststreichende Zonen verschiedener Festigkeit geschaffen. Diese Festigkeitsunterschiede bestimmten bei der Verfaltung der

Molasse in ihrem Gebiet sicher die Lage der Mulden und wahrscheinlich auch die Grenze zwischen gefalteter und ungefalteter Molasse. Vielleicht sind die Nonnenwaldmulde und die Penzberger-Mulde als Zeugen dieser Zungen anzusehen. Westlich von Penzberg gab es derartige Querstrukturen (quer zum Faltungsdruck) nur noch am Nordrand der subalpinen Molasse (Peissenberger- u. Ammer-Mulde). Der übrige Teil ist wegen der hohen Biegefestigkeit seiner zahlreichen Konglomeratbänke breit gefaltet und zum Teil aufgeschuppt. Das Gebiet der Mariensteiner-Mulde schliesslich, lag sicher meistens südlich der Zunge des Nesselburgfächers, da alle Schichten, die der UBM angehören, nach Norden mächtiger werden. Sie entstand wohl dadurch, dass ihr Südschenkel angehoben und ihr Nordschenkel gegen die Zunge des Nesselburgfächers gepresst wurde.

L I T E R A T U R

- BODEN K. - Beschaffenheit, Herkunft und Bedeutung des ostalpinen Molasseschuttes. Abh. geol. Landesunters. am Bayerischen Oberbergamt, H4, München 1931.
- BONSTEDT-KUPLETSKAJA E.M. - Die Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Mineralien. Jena 1954.
- BREYER F. - Dichtebestimmungen an Gesteinen aus den deutschen Erdölgebieten. Beitr. z. angew. Geophys. Berlin 1938.
- Versuche zur geologischen Deutung der reflexionsseismischen Messungen in der Gefalteten Molasse Bayerns. Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. -Ing., Vol.25, Nr. 68, Sept. 1958, S. 29-35.
- CLASEN G., & DOHR G. - Reflexionsseismische Messungen in der gefalteten Molasse Oberbayerns. Z. Dtsch. Geol. Ges., 109, S. 612, Hannover 1958.
- ELBERSKIRCH W. u. LEMCKE K. - Zur Tektonik der nordalpinen Molassesenke. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 105, Hannover 1953
- ENGELHARDT W. v. & PITZER H. - Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngrösse bei Sanden und Sandsteinen. Heidelbg. Beitr. z. Min. u. Petr., Bd. 2, S. 477-491, 1951.
- FISCHER G. - Gedanken zur Gesteinsystematik. Jb. d. Preuss. Geol. Landesanst., Bd. 54, S. 553-584, Berlin 1933.
- FÜCHTBAUER H. - Die Sedimentation der westlichen Alpenvorlandsmolasse. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 105, Hannover 1953
- GANSS O. - Das Süddeutsche Molassebecken - ein Überblick. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 105, S. 303-306, Hannover 1953
- GANSS O. & SCHMIDT-THOME P. - Die gefaltete Molasse am Alpenrand zwischen Bodensee und Salzach. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 105, S. 402-495, Hannover 1953.
- GILLITZER G. - Geologische Neuaufnahme des Peissenberger Kohlenreviers. Geol. Bavar., Nr. 23, München 1955.
- HAGN H. - Über die Umlagerungsverhältnisse in der subalpinen Molasse Oberbayerns und ihre Bedeutung für die alpine Tektonik. Geol. Bavar., Bd. 5, München 1950.
- HERBST G. & TEICHMÜLLER R. - Die Erdöllagerstätte am Tegernsee (Oberbayern). Kali und verwandte Salze, 30, Halle 1936.
- HOWARD W.V. & DAVID M.W. - Über die Entstehung der Porosität in Kalksteinen. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. 20, S. 1389-1412, 1936.
- JOHN H. - Geschwindigkeitsproblem im Bereich der schwäbischen Vorlandmolasse. E. u. K., H. 5, Jg. 9, 1956.
- KORDIUK B. - Zur Entwicklung des subalpinen Molassetroges. Abh. Preuss. Geol. L.-A., N.S., H. 187, Berlin 1938.
- KRAUS E. - Baugeschichte der Alpen. 2 Bde. Akademieverlag Berlin 1951.
- LAUGHTON A.S. - Laboratory measurements of seismic velocities

- in ocean sediments. Proceedings of Royal Society, 1954.
- LUFTSCHITZ H. - Die Systematik der Kalke. Tonind. Ztg., Nr. 77 und 79, Jg. 56, 1932.
- PILGER A. - Erdöl und Erdgas am Alpen- und Karpaten-Nordrand mit besonderer Berücksichtigung des Vorkommens am Tegernsee. Kali und verwandte Salze, Halle 1938.
- REICH H. - Ergebnisse bei refraktionsseismischen Untersuchungen im Alpenvorland zwischen Inn und Melk. Beiträge zur angewandten Geophysik, 9, 1942.
- Seismische Probleme im Alpenvorland. Verh. geol. B.-A., Nr. 1 - 3, Wien 1945.
- Über das elastische Verhalten des Tertiärs im Alpenvorland. Die Naturwissenschaften 33, 1946, S.345-346.
- RICHTER M. - Der westalpine Molassetrog. E u. K. 1, 1948, S.341 - 351.
- SCHIEMENZ S. - Schotteranalyse und Paläogeographie der Subalpinen Molasse Südbayerns. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 105 S. 396-401, Hannover 1953.
- Fazies und Paläogeographie der Subalpinen Molasse zwischen Bodensee und Isar. Im Druck.
- SCHMIDT-THOME P. - Neuere Kenntnisse über die Kalkalpenzone und die Alpenrandstrukturen in Südbayern. Geol. Rdsch., Bd. 37, S. 18-24, Stuttgart 1949.
- Untersuchungen im Flyschgebiet von Tölz (Oberbayern). Z. Dtsch. Geol. Ges., 102, Hannover 1951.
- TERRA H. de - Zur Erdölfrage im Bayerischen Flysch- und Molasse-Gebiet. Petrol 21, S. 2057-2061, 1925.
- TRAUB F. - Beitrag zur Kenntnis der miozänen Meeresmolasse ostwärts Laufen. N. Jb. Min. usw., Mon.-Hefte 1945/1948 B., S. 53-71 und 161-174.
- VOLL G. - Zur Mechanik der Molasseverformung. Geol. Bav. Nr. 17, München 1953.
- WEITHOFER K.A. - Molasse und Alpenrand in Oberbayern. Zbl. Min. 1932 B, S. 225 - 239.
- Das Vorkommen von Erdöl und Erdgas, von Jod und Schwefelwasser im südlichen Bayern. Z. Dtsch. Geol. Ges., Bd. 87, Stuttgart 1935.
- WILLIE N., GREGORY & GARDENER N. - Elastic Wave Velocities in Heterogeneous und Porous Media. Geophysics Nr. 1, S.41-70, 1956.
- WIESENEDER H. - Petrographische Analyse der Sedimentationsabfolge in der nordalpinen Saumtiefe Ober- und Niederbayerns N. Jb. Mineral. usw., Beil.-Bd. 88 B, Stuttgart 1953.
- ZEIL W. - Geologie der Alpenrandzone bei Murnau in Oberbayern. Geol. Bav. Nr. 20, München 1954.
- ZÖBBLEIN H.K. - Beiträge zur Kenntnis der Faltenmolasse im westlichen Oberbayern. E. u. K., 5, Hamburg 1952.

Bohrung: M U R N A U 1

Nr.	Kern / Kiste	Roh- -dichte	Rein-	Poros.	Kalk	Dolom.
1.	60,4-66,0 /3Ko.	2,540	2,735	7,7	29,23	4,21
2.	100,0-101,7 /1Kr.	2,640	2,731	3,5	40,18	22,35
3.	123,1-129,1 /1Kr.	2,462	2,691	9,3	33,72	16,18
4.	123,1-129,1 /3Ko.	2,612	2,727	4,4	32,93	24,92
5.	150,0-154,0 /1	2,571	2,737	6,4	32,39	20,31
6.	196,0-202,0 /1	2,547	2,720	6,8	34,73	8,44
7.	196,0-202,0 /2	2,578	2,721	5,5	19,65	12,20
8.	196,0-202,0 /3	2,482	2,739	10,5	20,99	16,42
9.	196,0-202,0 /4	2,547	2,734	7,4	19,21	14,36
10.	196,0-202,0 /5	2,565	2,750	7,2	23,16	23,90
11.	350,0-351,9 /1	2,672	2,777	3,9	19,73	42,47
12.	400,0-402,6 /1Kr.	2,636	2,762	4,8	11,35	37,51
13.	410,3-413,0 /1Kr.	2,725	2,777	1,9		
14.	410,3-413,0 /3Ko.	2,657	2,790	5,0	25,17	46,45
15.	448,4-451,4 /2	2,615	2,762	5,6	19,56	28,04
16.	500,0-502,1 /2Kr.	2,611	2,777	6,3	11,58	35,32
17.	550,0-552,7 /2	2,675	2,778	3,8	26,94	35,13
18.	590,8-592,4 /2Ko.	2,667	2,807	5,2		
19.	647,5-649,7 /2	2,742	2,802	2,2		
20.	700,0-700,5 /1	2,695	2,777	3,0	12,93	53,38
21.	755,6-757,5 /1	2,695	2,777	3,0	7,51	37,29
22.	793,0-795,0 /1Kr.	2,684	2,762	3,0	27,18	42,43
23.	841,5-843,0 /2Kr.	2,765	2,772	0,3	16,45	53,00
24.	890,4-892,4 /1	2,813	2,868	1,9		
25.	960,0-962,0 /2Ko.	2,738	2,782	1,7	14,63	56,60
26.	1004,7-1006,0/1Kr.	2,713	2,750	1,3	12,59	47,65
27.	1055,0-1057,0/1Kr.	2,711	2,737	0,9	9,83	47,50
28.	1110,0-1115,5/1Kr.	2,620	2,755	5,2	21,06	51,38
29.	1110,0-1115,5/6Kr.	2,705	2,768	2,3	10,78	42,37

Nr.	Kern / Kiste	Roh- -dichte	Rein-	Poros.	Kalk	Dolom.
30.	1152,5-1155,5/1	2,713	2,766	1,9	13,70	47,83
31.	1204,5-1207,0/2Ko	2,670	2,767	3,6	18,95	46,31
32.	1240,0-1242,5/2Ko	2,560	2,683	4,8	25,07	16,19
33.	1240,0-1242,5/3Ko	2,632	2,734	3,9	28,63	18,10
34.	1294,0-1297,7/2	2,779	2,814	1,3	19,45	50,15
35.	1294,0-1297,7/3	2,743	2,786	1,5	19,04	44,70
36.	1294,0-1297,7/4	2,681	2,717	1,3		
37.	1403,0-1404,3/1Kr.	2,710	2,745	1,2	21,35	25,00
38.	1448,0-1449,0/1				16,90	48,20
39.	1504,0-1506,9/3	2,530	2,748	8,5	39,55	--
40.	1550,0-1552,0/1	2,523	2,753	9,1	18,51	21,27
41.	1550,0-1552,0/2	2,556	2,750	7,5		
42.	1610,0-1611,2/1	2,510	2,720	7,7	21,05	11,04
43.	1656,1-1660,0/1	2,560	2,737	6,9	14,14	36,00
44.	1656,1-1660,0/2	2,556	2,747	7,4		
45.	1656,1-1660,0/3	2,571	2,760	7,3		
46.	1656,1-1660,0/4	2,552	2,738	7,2		
47.	1719,4-1722,0/1				15,39	14,20
48.	1788,3-1791,3/1	2,575	2,752	6,9	23,10	24,15
49.	1931,0-1933,7/1	2,497	2,716	8,8	12,95	31,86
50.	1986,7-1989,0/1	2,517	2,750	9,2	18,06	20,56
51.	2130,0-2175,5/1	2,486	2,705	8,8	22,65	12,58
52.	2240,0-2242,7/1				20,35	14,90
53.	2569 -2571 /1	2,500	2,715	8,6	18,60	17,15
54.	2569 -2571 /2	2,505	2,719	8,5		
55.	2775,0-2778,8/1	2,530	2,704	6,9		
56.	2775,0-2778,8/2	2,525	2,714	7,5		
57.	2775,0-2778,8/3Ko	2,525	2,709	7,2	21,00	13,99
58.	2775,0-2778,8/3	2,502	2,725	8,9		

- NC = nichtcarbonatischer Anteil der Proben in %
 UL = in verdünnter warmer Salzsäure unlöslicher, bei 850°
 geglühter Rückstand
 dUL = NC - UL
 dGV = Differenz zwischen dem Glühverlust (GV), der Probe
 und der Summe der aus dem Kalk- und Dolomitgehalt be-
 rechneten Kohlensäure
 Fe_2O_3 = beim Auflösen der Carbonate mit in Lösung gegangenes
 Eisen als Eisen-III-oxyd berechnet
 LF = Absorptionswasser der luftfeuchten Probe
 Psammit = Siebfraction 666 des carbonatfreien Anteils

Nr.	NC	UL	dUL	dGV	Fe_2O_3	LF	Psammit	GV
1.	66,56	61,80	4,76	3,24	2,52	0,23	0,1	18,12
2.	37,47	35,12	2,35	1,41	2,45	0,29	1	29,75
3.	50,10	44,55	5,55	1,09	3,36	1,74	1	23,60
4.	42,15	40,15	2,00	1,09	0,77	0,87	8,2	27,48
5.	47,30	43,70	3,60	2,94	1,85	1,14	1	26,89
6.	56,83	48,90	7,93	3,61	2,51	1,54	0,5	22,93
7.	68,15	58,75	9,40	3,77	3,48	1,10	0,6	18,23
8.	62,59	56,92	5,67	3,57	1,65	0,23	0,3	20,65
9.	66,43	57,20	9,23	4,42	2,85	2,11	0,5	19,73
10.	52,94	52,50	0,44	0,81	1,69	1,44	1	22,40
11.	37,80	35,90	1,90	1,32	0,60	0,63	5,0	30,25
12.	51,14	46,55	4,59	2,11	3,19	1,36	.	25,00
13.								37,30
14.	28,38	25,30	3,08	0,77	2,11	0,39	1	34,00
15.	52,14	48,85	3,55	2,42	1,17	0,94	1	24,40
16.	55,10	45,38	9,72	3,46	3,32	1,49	1	25,40
17.	37,93	33,15	4,78	2,23	1,98	0,68	0,6	30,84
18.								
19.								
20.	33,69	31,55	2,14	1,18	0,37	0,25	23,8	32,30
21.	55,20	47,96	7,24	1,83	4,73	0,52	14,2	22,93
22.	30,39	25,72	4,67	1,49	3,20	0,61	0,0	33,70
23.	30,55	27,20	3,35	1,50	1,18	0,41	1,7	34,02
24.								

Nr.	NC	UL	dUL	dGV	Fe ₂ O ₃	LF	Psammit	GV
25.	28,77	24,73	4,04	1,26	2,05	0,41	4,3	34,70
26.	39,76	36,23	3,53	1,87	1,21	0,50	5,8	30,13
27.	42,67	38,70	3,97	1,40	2,95	1,17	-	28,38
28.	27,56	23,22	4,34	0,03	2,53	0,20	27,6	33,80
29.	46,65			0,34		0,58		25,31
30.	38,47			2,33		0,75		31,17
31.	34,74			1,66		0,61		32,10
32.	58,74			2,36		0,72	12,3	21,11
33.	53,27			2,89		0,88		24,12
34.	30,40			2,34		0,10	10,10	34,80
35.	36,26			0,41		0,79		30,10
36.							3,1	34,30
37.	53,65			1,51		0,33	1,0	22,91
38.	34,90			1,12		0,18	20,6	31,55
39.	60,45			3,28		1,40		20,70
40.	60,22			2,10		1,50	1,0	20,38
41.								
42.	67,91			3,99		1,82		18,52
43.	49,86			3,02		0,69		26,44
44.								
45.								
46.								
47.	70,41			3,62		1,70		17,16
48.	52,75			3,09		0,98		24,78
49.	55,19			3,11		1,00		23,95
50.	61,29			2,80		1,52	1,0	20,60
51.	64,77			3,28		1,59		19,25
52.	64,75			3,44		1,61		19,50
53.	64,25			3,44		1,48		19,80
54.								
55.								
56.								
57.	65,01			2,18		0,95	1,0	19,08
58.								

Murnau 1

B e s c h r e i b u n g d e r P r o b e n s t ü c k e

Proben Nr.	1	-	10	Obere Cyrenen-Schichten
	Nr. 11	-	30	Untere Bunte Molasse
	Nr. 31	-	38	Untere Cyrenen-Schichten
	Nr. 39	-	58	Tonmergelschichten

Beschaffenheit der Proben

1. Blaugrauer Mergel mit braunen Schlieren, scherbiger Bruch
2. hellgrauer sandiger Kalkmergel
3. blaugrauer Mergel mit br. Schlieren und scherbigem Bruch
4. blaugrauer Mergel, sandig
5. grünlichgrauer schwach sandiger Mergel
6. dunkler, rauher Mergel
7. grünlichgrauer Tonmergel
8. grünlichgrauer Mergel mit braunen Schlieren, muschliger Bruch
9. dunkler, schwach sandiger Mergel mit braunen Schlieren
10. blaugrauer, stark braun gefleckter Mergel, muschliger Bruch
11. hellgrauer Dolomitmergel, braun gefleckt, schw. glimmerig
12. dunkler Dolomitmergel, feinglimmerig, rauher Bruch
13. graubrauner Dolomitmergel, rauher Bruch
14. grüngrauer Dolomitmergel, rauher Bruch
15. bräunlich bis grauer Merg., glimmerig, Bruch sehr rau
16. buntgefleckter Mergel, schwach glimmerig, rauher Bruch
17. stark braun gefleckter Dolomitmergel, scherbiger Bruch
18. bunter Kongl. mit Kalk-, Dolomit- und Grundgebirgsanteile
19. bunt. Kongl. mit Kalk, Dolom. u. Quarz, ^{bis 6 cm Durchmesser} ca. 8 mm D.
20. grau-grüner, sandiger Dolomitmergel mit roten Flecken
21. grauer sandiger Mergel mit braunen Flecken, stark glimmerig
22. stark gefleckter Dolomitmergel, muscheliger Bruch
23. dunkelroter Dolomitmergel rauher Bruch
24. buntes Konglomerat mit Kalk-, Dolomit- u. Quarzanteilen.

Murnau 1

25. blaugrauer, braungefleckter Dolmerg., mit Glimmerlagen
26. bunter Dolomitmergel, rauher Bruch
27. bunter Dolomitmergel, scherbiger Bruch
28. graublauer Mergel
29. hellgrauer Sandstein mit Kreuzschichtung
29. gelblicher Sandstein
30. braungefleckter Mergel, rauher Bruch
31. grauer Dolomitmergel, Bruch rau und kantig, schwach glimmerig
32. grünlichgrauer Mergel, vereinzelt braune Flecken, Bruch rau
33. wie 32
34. blaugrauer Dolomitmergel mit Pyritknäollen
35. grauer, schlrieriger Dolomitmergel mit Gleitflächen
36. Mergel mit Kohleschmitzen und sehr rauhem Bruch
37. dunkler schlrieriger Mergel
38. dunkler Dolomitmergel, rauher Bruch
39. grauer Kalkmergel, erdiger Bruch
40. grauer, geschichteter Mergel
41. wie 40
42. grauer, blätteriger Mergel
43. mittelgrauer, sandiger Mergel mit Gleitflächen
44. dunkelgrauer Mergel mit Kluftverheilungen und Pflanzen-
45. häcksel auf den Schichtflächen
46. tektonisch stark beanspruchter, mausgrauer Mergel
48. grauer Mergel mit Gleitflächen und Kluftverheilungen
49. hellgrauer, tekt. stark beanspruchter Merg. mit Harnischen
50. mittelgrauer Mergel mit Gleitflächen
51. grauer, zum Teil blättriger Mergel
52. stark beanspruchter Mergel, Harnische, Kluftverheilungen
53. grünlichgrauer geschichteter Mergel mit Gleitflächen
54. grauer Mergel mit Gleitflächen
55. dunkelgrauer Mergel, erdiger Bruch
56. dunkler sandiger Mergel mit diskordanten Gleitflächen
57. grauer Mergel mit erdigem Bruch und harnisch
58. wie 57

Bergwerk Marienstein

Die Proben entstammen der Richtstrecke (Nr.1-8), der 6. Sohle des Querschlags 2 West (Nr.9-52) und dem von dort aus abgeteuf-ten Muldenschacht (Nr.53-60).

E = für Nr.1-52 - Entfernung der Entnahmestelle vom Hauptschacht
für Nr.53-60 - Teufe der Entnahmestelle

Nr.	E	Roh- -dichte	Rein-	Poros.	Kalk	Dolom.	GV	GV	NC
1.	0	2,586	2,722	5,0	18,35	19,28	18,94	1,67	62,37
2.	170	2,539	2,699	6,0	25,18	10,50	18,87	2,79	64,32
3.	360	2,629	2,740	4,1	14,17	12,71	15,45	3,15	73,12
4.	880	2,507	2,737	8,4					
5.	995	2,464	2,756	10,6					
6.	720	2,414	2,615	7,8					
7.	800	2,408	2,546	5,6	0,61	14,26	7,94	0,86	85,13
8.	1095	2,684	2,749	2,4	28,25	31,12	28,54	1,25	40,63
9.	1200	2,502	2,718	7,9	22,07	28,31			49,62
10.	1220	2,687	2,754	2,4	21,06	46,22	33,45	2,13	32,72
11.	1270	2,619	2,767	5,4	9,25	42,12	26,30	2,13	48,63
12.	1280	2,605	2,686	3,0					
13.	1290	2,717	2,793	2,7	23,57	50,14	34,41	0,13	26,29
14.	1300	2,727	2,788	2,0	17,26	47,31	31,33	1,15	35,43
15.	1340	2,678	2,789	4,0	19,70	47,90	33,60	2,08	32,40
16.	1360	2,731	2,793	2,2	26,50	46,40	34,63	0,84	27,10
17.	1370	2,585	2,726	5,2	29,74	12,97	20,10	0,82	58,29
18.	1390	2,601	2,744	5,2					
19.	1400	2,547	2,730	6,6					(47,50)
20.	1455	2,650	2,763	4,1	16,97	50,89	33,10	1,36	33,14
21.	1470	2,591	2,779	6,8	15,03	49,51	30,12	--	35,46
22.	1500	2,640	2,770	4,7	14,69	53,28	34,58	2,70	32,03
23.	1525	2,582	2,731	5,4	14,74	11,24	13,00	1,16	74,02
24.	1530	2,632	2,781	5,3					
25.	1610	2,658	2,763	3,8					
26.	1630	2,671	2,774	3,7	20,64	44,33	32,08	1,85	35,03
27.	1660	2,674	2,716	1,8					
28.	1668	2,712	2,795	3,0					
29.	1670	2,686	2,798	4,0	22,00	48,72	34,15	1,22	29,28
30.	1690	2,669	2,764	4,2	20,40	39,68	30,60	2,70	39,92

Bergw. Marienstein

Nr.	E	Roh- -dichte	Rein-	Poros.	Kalk	Dolom.	GV	GV	NC
31.	1710	2,684	2,753	2,5	31,76	43,89	36,73	1,83	24,35
32.	1749	2,689	2,772	3,0					
33.	1750	2,653	2,751	3,6					
34.	1770	2,660	2,789	4,4	21,02	50,95	35,45	1,90	28,03
35.	1795	2,714	2,822	3,8					
36.	1800	2,678	2,787	3,9	18,44	50,58	32,98	0,77	30,98
37.	1840	2,606	2,780	6,4	30,20	33,19	30,70	1,58	36,61
38.	1880	2,748	2,795	1,7					
39.	1904	2,582	2,809	8,1					
40.	1905	2,583	2,799	7,7	18,49	46,10	32,57	2,44	35,41
41.	1975	2,729	2,782	1,9	14,30	47,90	31,10	1,96	37,80
42.	2020	2,669	2,775	3,8	23,53	40,41	30,70	1,06	36,06
43.	2080	2,687	2,780	3,4					
44.	2095	2,689	2,786	3,5	24,42	51,02	36,34	1,24	24,56
45.	2100	2,655	2,749	3,2	15,16	26,02	21,05	1,97	58,82
46.	2130	2,644	2,813	6,0	16,90	36,70	26,50	1,56	46,40
47.	2180	2,692	2,780	3,1					
48.	2200	2,594	2,792	7,1	9,22	48,95	28,10	0,69	41,83
49.	2202	2,684	2,753	1,8					
50.	2315	2,473	2,676	7,1					
51.	2385	2,651	2,760	3,9					
52.	2395	2,593	2,724	4,8					
53.	650	2,684	2,753	2,5	31,76	43,89	36,73	1,83	24,35
54.	680	2,479	2,716	8,8					
55.	695	2,695	2,768	2,9					
56.	719	2,471	2,740	9,6					
57.	729	2,628	2,725	3,5					
58.	747	2,635	2,717	3,1					
59.	785	2,522	2,719	7,3					
60.	801	2,672	2,768	3,5					

Bergw. Marienstein

Nr.	Carb.	UL	UL	Psammit	Fe ₂ O ₃	LF
1.	37,63					1,33
2.	35,68					1,76
3.	26,88				1,70	1,00
4.						
5.						
6.						
7.	14,87					0,16
8.	59,37	35,63	4,00	0,1	2,23	0,75
9.	50,38	46,70	2,92		2,97	2,23
10.	67,28	28,55	4,17	2,5	1,28	
11.	51,37	44,15	3,48	0,8	1,37	1,96
12.						
13.	73,71			18,7	1,13	0,20
14.	64,57	32,40	3,03	11,6	1,71	0,57
15.	67,60	27,75	4,65	0,3	1,63	0,58
16.	72,90	24,35	2,75		1,93	
17.	41,71	54,10	4,19	8,6	3,16	1,01
18.						
19.		47,50			0,93	1,04
20.	66,86	28,88	4,26	0,6	1,50	0,83
21.	64,54	35,02	0,44	28,0	0,59	0,41
22.	67,97	26,15	5,88		1,60	
23.	25,98	71,56	2,46	53,6	0,85	0,52
24.						
25.						
26.	64,97	29,50	5,53	0,0	3,54	0,78
27.						
28.						
29.	70,72			0,1	2,97	0,60
30.	60,08	32,62	7,30		3,22	

Bergw. Marienstein

Nr.	Carb.	UL	UL	Psammit	Fe ₂ O ₃	LF
31.	75,65	18,83	5,52	0,0	2,54	0,47
32.						
33.						
34.	71,97	23,45	4,58	--	1,18	
35.						
36.	69,02			0,5	1,57	0,64
37.	63,39			0,3	1,70	1,46
38.						
39.						
40.	64,59			--	2,15	1,20
41.	62,20	33,65	4,15	1,7	1,84	
42.	63,94				1,37	0,6
43.						
44.	75,44			--	3,30	0,96
45.	41,18				2,15	
46.	53,60			0,1	3,03	0,49
47.					2,92	0,73
48.	58,17				3,01	0,94
49.						
50.						
51.						
52.						
53.	75,65	18,83	5,52	--	2,54	0,47
54.						
55.						
56.						
57.						
58.						
59.						
60.						

Bergw. Marienstein

Proben Nr. 1 - 3	Tonmergel-Schichten
Nr. 4 - 7	Baustein-Schichten
Nr. 8,9 u. Nr. 50-52	Untere Cyrenen-Schichten
Nr. 10-49 u. Nr. 53-60	Verzahnungszone der UBM mit Cyr.

1. Dunkelgrauer Mergelm rauher und scherbiger Bruch
2. dunkelgrauer Tonmergel, Bruch glatt und scherbig
3. dunkelgrünlichgrauer Mergel, rauh
4. grober, graubrauner, geschichteter Sandstein z.T. konglom.
5. wie Nr. 4, kein Kongl.
6. gelblichgrauer, schwach gebundener, grobkörniger Quarzsand-
stein
7. wie Nr. 6
8. dunkelgrauer, gebankter Mergel, scherbiger Bruch
19. mittelgrauer, stark braun gefleckter Dolomitmergel, scherbig
9. dunkelgrauer Tonmergel, Bruch glatt und scherbig
11. grauer Dolomitmergel, Bruch rauh, tekt. beansprucht
12. grauer sandiger Mergel, rauher Bruch
13. hellgrauer Dolomitmergel, Bruch rauh, schwach glimmerig
14. grauer Dolomitmergel, rauher Bruch
15. grauer Mergel
16. grünlichgrauer Dolomitmergel, scherbiger Bruch
17. grünlichgrauer, schwach sandiger Mergel
18. grauer sandiger Mergel, rauher Bruch
19. hellgrauer, grober Sandstein
20. grauer Dolomitmergel, Bruch kantig
21. hellgrauer mittelfeiner Sandstein, schwach absandend
22. grauer Dolomitmergel, braun gefleckt, schwach glimmerig
23. grünlichgrauer Sandstein, viel Glimmer
24. grauer Dolomitsandstein
25. graubrauner Tonmergel mit bitumin. Lagen
26. dunkelgrauer, braun gefleckter Mergel, scherbiger Bruch
27. grünlichgrauer, sandiger Mergel, rauher Bruch
28. grünlichgrauer, schwach sandiger Mergel
29. grünlichgrauer Kalkmergel, rauher Bruch, tekt. beansprucht
30. grüner Mergel, stark braun gefleckt, scherbiger Bruch

Bergw. Marienstein

31. hellgrauer Mergel, rauher Bruch
32. grauer Mergel, rauher Bruch
33. grauer Mergel
34. grünlicher Mergel, scherbiger Bruch, kleine dunkle Flecke
35. grauer Mergel, scherbiger Bruch
36. grauer Dolomitmergel, rauher Bruch
37. graubrauner Mergel, scherbiger Bruch
38. grauer, gebankter Kalkmergel
39. wie Nr. 38
40. grünlichgrauer, geschichteter Mergel, braun gefleckt.
41. dunkelgrauer Mergel, massig, rauher Bruch
42. mittelgrauer, schwach sandiger Mergel
43. grauer, schwach braun gefleckter Dolomitmergel, scherbig
44. grauer Tonmergel, braun gefleckt, Bruch glatt u. muscheliger
45. grünlichgrauer Mergel, staubsandig, viel Glimmer
46. wie Nr. 45, aber etwas heller
47. grünlichgrauer, gebankter, sandiger Mergel, schwach glimmerig
48. hellgrauer, geflaschter Dolomitmergel, rauher Bruch
49. hellgrauer, stark verbackener Sandstein, mittelfein bis
50. dunkelgrauer, gebankter Tonstein, Bruch glatt z. scherbiger
51. mittelgrauer Mergel, scherbiger Bruch
52. schwarzbrauner, stark bituminöser Mergel
53. wie Nr. 31
54. blaugrauer Tonstein, braun gefleckt, Bruch glatt u. scherbiger
55. graubrauner Dolomitmergel, scherbiger Bruch
56. grünlichgrauer Sandstein, leicht absandend, glimmerig
57. buntes Konglomerat mit Kalk, Dolomit u. Quarzgeröllen, feinsandiges Bindemittel
58. dunkler, stark sandiger Mergel
59. dunkelgrauer Tonmergel, muscheliger Bruch
60. grünlichgrauer Dolomitmergel, scherbiger Bruch

Bohrung: T Ö L Z 1

Nr.	Teufe m	Roh- -dichte	Rein-	Poros. %	Kalk %	Dolom. %	v m/sek.
1.	184	2,726	2,795	2,5			2760
2.	450	2,758	2,780	0,8	22,42	60,50	3680
3.	498	2,441	2,679	8,9	22,72	9,86	3350
4.	505	2,445	2,662	8,1	25,60	10,21	3430
5.	737	2,633	2,764	4,7	34,72	8,11	3920
6.	770	2,620	2,730	4,0	21,65	27,80	3570
7.	865	2,510	2,680	6,7			3500
8.	915	2,575	2,728	5,6	34,82	0,70	3118
9.	1033	2,488	2,677	7,0	23,40	7,20	3440
10.	1233	2,565	2,662	3,6			3984
11.	1238	2,572	2,686	4,2	28,47	5,20	3984
12.	1450	2,576	2,682	4,0	34,95	4,61	3550
13.	1582	2,594	2,717	4,6	19,24	23,05	3700
14.	1717	2,716	2,755	1,4			
15.	2184	2,344	2,699	13,5			

Nr.	NC	GV	dGV	UL	dUL	LF	Psammit
1.							
2.	17,08	40,13	1,36	14,50	2,58	0,41	1,2
3.	67,42	17,73	3,03			1,90	
4.	64,19	19,62	3,48	57,00	7,19	1,73	
5.	57,17	19,77	0,61	54,85	2,32	0,09	45,1
6.	50,55	25,92	3,12			0,88	
7.							
8.	64,48	18,12	2,47	60,35	4,13	1,21	29,0
9.	69,40	15,45	1,72			1,44	24,1
10.							
11.	66,33	16,63	1,26			0,99	24,0
12.	60,44	15,88				0,47	43,8
13.	57,71	20,47	1,00			0,33	32,2
14.							1,3
15.							

v = seismische Geschwindigkeit durch Bohrlochmessung ermittelt

B e s c h r e i b u n g d e r P r o b e n s t ü c k e

Proben Nr. 1 u. 2	Promberger Schichten
Nr. 3 - 6	Obere Cyrenen-Schichten
Nr. 7 - 14	Untere Bunte Molasse mit Cyrenen-Schichten verzahnt
Nr. 15	Bausteinzone

Beschaffenheit der Proben

1. dunkler Dolomitmergel, schwach sandig
2. dunkler Dolomitmergel, etwas glimmerig
3. dunkler Mergel mit scherbigem Bruch
4. grauer Mergel, scherbiger Bruch
5. hellgrauer Kalksandstein mit Quarz und Feldspatanteilen
6. grauer Mergel mit scherbigem Bruch
7. bunter sandiger Mergel
8. grünlichgrauer, erdiger Sandmergel mit braunen Flecken
9. grünlichgrauer, feinschichtiger Sandmergel
10. bunter Mergel
11. bunter sandiger Mergel
12. bunter Sandstein, leicht absandend
13. hellgrauer, sandiger Mergel mit Muschelschalen
14. bunter Mergel, rauher Bruch
15. grober Sandstein, hoher Quarzanteil

Zus. Nr. 7 : $UL = 56,69$; $dUL = 4,23$; $Fe_2O_3 = 1,12$

Nr.	B/Teufe	Roh- -dichte	Rein- Poros.	Kalk	Dolom.	GV	dGV	LF
1.	1/560	2,568	2,705	4,4				
2.	1/586	2,407	2,713	10,9	16,38	14,47		0,57
3.	2/204	2,482	2,746	9,6	38,80	8,49	24,36	3,25 1,32
4.	2/411	2,099	2,644	19,3				
5.	2/469	2,629	2,734	3,3	41,28	33,95	35,75	1,38 0,79
6.	2/481	2,501	2,739	6,5				
7.	2/482	2,724	2,764	1,5				
8.	2/553	2,660	2,781	4,3				
9.	2/593	2,308	2,705	13,8				
10.	2/630	2,579	2,709	4,0	24,78	6,11	15,15	1,33 0,39
11.	3/353	2,452	2,729	10,8				
12.	5/186	2,319	2,732	14,9				

Nr. 10: Psammit = 50,2

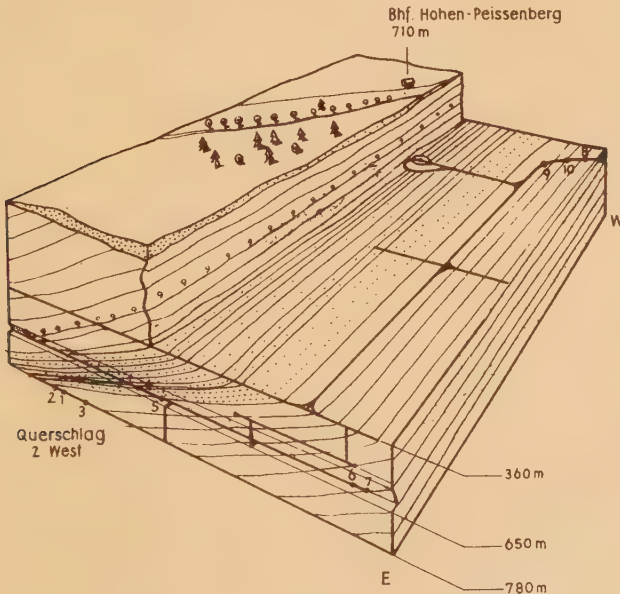
Peissenberg

B e s c h r e i b u n g d e r P r o b e n s t ü c k e

Proben Nr. 1-3 u. 5-10	Obere Cyrenen-Schichten
Nr. 4	unterer Glassand (Promberger-Schichten)

Beschaffenheit der Proben

1. Grünlichgrauer, stark sandiger Mergel
2. schwarzgrauer Tonmergel, scherbiger Bruch, vereinzelt Muschelschalen
3. schwarzgrauer Mergel mit rauhem und kantigem Bruch
4. leicht absandender, heller Quarzsandstein
5. dunkler Tonmergel, vereinzelt Muschelschalen
6. grünlichgrauer, schwach gefleckter Mergel, scherbiger Bruch
7. schwarzgrauer Mergel, vereinzelt Muschelschalen
8. heller, grünlichgrauer sandiger Mergel
9. hellgrauer, sandiger Mergel
10. grünlichgrauer, sandiger Mergel, massig



Die Entnahmestellen der Proben im Bergwerk
Peissenberg.

Au 1;2;3;5

B e s c h r e i b u n g d e r P r o b e n s t ü c k e

Alle Proben entstammen den Cyrenen-Schichten

Beschaffenheit der Proben

1. Hellgrauer Sandmergel
2. hellgrauer Sandstein, feinschichtig mit Glimmern und stellenweise org. Substanz auf den Schichtflächen
3. grünlichgrauer Kalkmergel mit Schneckenschalen
4. gelblicher, grossporiger Stinkstein
5. grauer Kalkmergel mit Muschelschill
6. dunkler Mergel mit scherbigem Bruch und vereinzelt Muschel- und Schneckenschalen
7. wie Nr. 6, Turmschnecken sind häufiger
8. hellgrauer, staubsandiger, fein geschichteter Mergel mit Glimmer
9. wechselnde Ton- und Sandmergellagen, submarine Rutschung
9. hellgrauer Kalk-Quarzsandstein
10. grauer Sandstein
11. dunkler, fein geschichteter Tonmergel
12. hellgrauer, stark staubsandiger Mergel

L e b e n s l a u f

Am 5. Mai 1928 wurde ich als Sohn des Dipl.Berg-Ing. Alois Wächter in Osseg in der Tschechoslovakei geboren. Nach dem Besuch der Oberschulen in Teplitz-Schönau und St. Joachims-thal/Erzgeb. erhielt ich als Luftwaffenhelfer das Notabitur zugesprochen. Aus der Kriegsgefangenschaft zurückgekehrt, legte ich 1946 an der Oberschule Neumarkt i. Opf. die Reifeprüfung ab.

1948 begann ich mit dem Studium der Mathematik und Physik an der Hochschule in Regensburg. 1953 setzte ich meine Studien an der Universität München fort und legte hier das Vordiplom für Physik und 1956 die Diplomprüfung für Geophysik ab.

